

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Н. А. ВАЛЮС

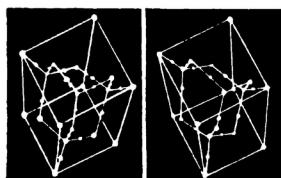


СТЕРЕОСКОПИЯ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
КОМИССИЯ ПО НАУЧНОЙ ФОТОГРАФИИ И КИНЕМАТОГРАФИИ

Н. А. ВАЛЮС

СТЕРЕОСКОПИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА • 1962

О Т В Е Т С Т В Е Н Н Ы Й Р Е Д А К Т О Р

член-корреспондент АН СССР

К. В. Ч И Б И С О В

ПРЕДИСЛОВИЕ

Стереоскопия — это наука о зрительном восприятии трехмерности окружающего нас пространства. Однако как под словом «оптика» часто подразумевают не только науку о свете и законах его распространения, но также и технические приборы, используемые для преобразования световых потоков, теорию расчета этих приборов, так и под словом «стереоскопия» обычно понимают более широкий круг вопросов. В этот круг вопросов входят психофизиологические особенности восприятия пространственной картины, оптические принципы и технические средства построения видимого пространственного образа предметов.

Стремление осуществить воспроизведение изображений, создающих впечатление объемности и телесности изображаемых предметов, можно проследить с давних времен. Уже в XV в. Леонардо да Винчи занимался этим вопросом, пытаясь дать ему научное обоснование. В 1593 г. Порта установил, что в нашем сознании комбинируются изображения, полученные обоими глазами, и описал отдельные изображения стереопары.

Первые работы по созданию устройств, позволяющих искусственно наблюдать стереоскопический эффект, относятся к середине XIX в. В 1833 г. Уитсон изготовил первый зеркальный стереоскоп, а в 1849 г. Брюстер разработал линзовый стереоскоп. К этому же времени относится и создание первых стереоскопических фотоаппаратов. В дальнейшем техника воспроизведения стереоскопических изображений, т. е. изображений, создающих впечатление объемности, продолжала совершенствоваться. Уже в 1858 г. появляются технические средства для проекционного воспроизведения стереоскопических изображений — метод анаглифов и эклипсный метод.

В начале нынешнего столетия были найдены способы изготовления еще более совершенных стереоскопических изображений, которые могут рассматриваться свободно, без применения каких-либо оптических устройств. Появление таких автостереоскопических изображений стало возможным только в результате создания новых мелкоструктурных растровых оптических систем. Большая заслуга в разработке этих оптических средств принадлежит Г. Липпману и нашему соотечественнику проф. П. П. Соколову, который получил впервые в 1911 г. пространственные интегральные изображения, отличающиеся возможностью не только стереоскопического наблюдения их, но и возможностью рассматривания изображенных объектов в различных ракурсах со всевозможных точек зрения.

Еще большие успехи достигнуты в наше время. В Советском Союзе появилось первое в мире безочковое стереокино, созданное по методу советского изобретателя С. П. Иванова. А теперь, как показали работы

проф. П. В. Шмакова, стало возможным стереоскопическое воспроизведение и телевизионных изображений.

Большую роль в освоении техники воспроизведения стереоскопических изображений сыграли принципиальные работы в области психофизиологических особенностей стереоскопического зрения, проведенные советскими учеными: С. В. Кравковым, Л. Н. Гассовским, Е. М. Белостоцким и другими. Значительный вклад в технику воспроизведения стереоскопических изображений внесли многие советские изобретатели. В научно-исследовательском кинофотоинституте (НИКФИ) А. Н. Левингтоном была разработана оригинальная система анаглифической кинопроекции, а автором совместно с М. М. Басовым — поляризационная система стереоскопической проекции. Особый вид пространственного воспроизведения изображений получен в системе «панорамного» кино, разработанной в последнее время коллективом работников НИКФИ под руководством Е. М. Голдовского.

Применение стереоскопии для измерительных целей впервые было реализовано русским ученым Н. А. Умовым в созданных им еще в 1895 г. стереоскопических дальномерах. Немалые заслуги принадлежат: Ф. Ф. Дробышеву, А. С. Скиридову, М. Д. Коншину и М. М. Русинovu, которые создали оригинальные конструкции отечественной аппаратуры для стереофотограмметрии и развили теорию этого точнейшего метода пространственных измерений, имеющего важное значение во многих областях техники и особенно для картографирования земной поверхности. Трудно перечислить все области, где применение стереоскопии оказалось полезным. Сейчас стереоскопические методы исследований и измерений находят успешное применение в самых разнообразных областях науки и техники: в астрономии, медицине, строительстве, при геологических изысканиях, в архитектуре и многих других областях.

Применение стереоскопической фотографии во многих исследованиях имеет несомненные преимущества перед обычной фотографией благодаря пространственному представлению, создаваемому стереоскопическими изображениями. Так, например, густые леса, ледники, кристаллы, анатомические и гистологические препараты, совершенно невыразительные при обычной съемке, оживают в стереофотографии.

Стереоскопическое фотографирование и киносъемка находят применение в рентгеноскопических и микроскопических исследованиях, а теперь в электронном микроскопии и при ядерных исследованиях. Вообще везде, где нужны наибольшая наглядность и выразительность представления, стереоскопическая фотография имеет преимущества перед обычной фотографией.

Значительные работы по практическому освоению техники изготовления печатных объемных иллюстраций проведены С. С. Гуревичем. Объемные иллюстрации нашли применение в работах академика А. В. Шубникова в области кристаллографии, С. С. Брюхоненко в области медицины, М. А. Шестакова в начертательной геометрии, А. К. Клементьева в архитектуре и строительстве. Для этих целей, очевидно, будут представлять интерес стереофотографии, выполненные на линзово-растровой пленке, рассматриваемые непосредственно, без стереоскопа. Образцы таких стереофотографий на основе идей П. П. Соколова впервые в Советском Союзе выполнены автором совместно с Г. В. Авиловым. Можно полагать, что изготовление подобных фотографий на отражательных подложках позволит использовать их в качестве стереоскопических книжных иллюстраций.

Особенно выразительными оказываются цветные стереоскопические изображения, которые теперь возможно получать в связи с развитием техники цветного фотографирования, цветной кинематографии и цветного телевидения.

В настоящей книге кратко изложены основные представления о физике и психофизиологии зрительного акта, формирующего зрительный пространственный образ, и затем рассмотрены приемы искусственного воссоздания видимого пространственного образа предметов на основе законов стереоскопического видения.

Так как осуществление наиболее совершенных способов воспроизведения стереоскопических изображений немыслимо без применения растровых оптических систем, то в книге уделяется известное место разбору этих систем. Большое внимание в книге уделено рассмотрению общих принципиальных условий воспроизведения пространственного зрительного образа и несколько меньшее — техническим средствам реализации этих условий.

В последней главе рассматриваются основные оптические законы воспроизведения пространственных соотношений в стереоскопическом изображении и вводятся основные понятия о метрике стереоскопического пространства. Кажется, что таким путем удалось сделать изложение по возможности популярным и более кратким, но в то же время достаточно полно охватывающим всю рассматриваемую проблему.

Первые две главы рассчитаны на читателя, впервые знакомящегося с вопросами стереоскопии. В остальных главах излагается материал, который представляет интерес и для специалистов в области стереоскопии. Последняя глава требует от читателя более внимательного чтения и знания элементов высшей алгебры и математического анализа.

К. В. Чибисов

Глава I

ЗРИТЕЛЬНОЕ ВОСПРИЯТИЕ ПРОСТРАНСТВА И СТЕРЕОЭФФЕКТ

§1. Определение трехмерности реального пространства. §2. Условия возникновения пространственного представления. §3. Некоторые особенности зрительного аппарата. §4. Бинокулярное зрение и стереоскопический эффект. §5. Особенности стереоскопического восприятия пространства. §6. Особенности бинокулярного восприятия цвета. §7. Дополнительные факторы, обуславливающие пластичность зрительного образа. §8. Пластика движения и динамический стереоэффект. §9. Ошибки стереоскопического зрения и некоторые стереоскопические иллюзии.

§ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕХМЕРНОСТИ РЕАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА

Физическая картина мира, какой она воспринимается человеком, представляет собой пространственно-временной континуум, в котором, по крайней мере, все существующие макроскопические материальные тела имеют трехмерную пространственную протяженность. Если отвлечься от микромира с его квантовыми соотношениями, уводящими нас от привычных пространственных представлений, то любой реальный предмет в окружающем мире представляется нам имеющим определенную ширину, высоту и толщину.

На языке наших ощущений одна мера пространственной протяженности дает нам представление о линии и ее длине. Два измерения позволяют оценивать протяженность поверхности. Три измерения характеризуют объем тела и его расположение в пространстве. Естественное определение трехмерности реально существующих физических тел человеку дают ощущения. Своими глазами мы видим все разнообразие находящихся вокруг нас предметов, разнообразие их телесных форм и особенностей взаимного расположения. Можно закрыть глаза, но и тогда, ощупывая руками, мы обнаружим расположенные вокруг нас предметы и определим их удаленность. При детальном ощупывании мы получаем ясное представление об объеме, форме предметов и рельефе их поверхности.

Таким образом, мы видим, что зрение и осязание дают возможность человеку получать непосредственную информацию о пространственной картине окружающего мира. В очень небольшой мере человек может получать сведения о пространственном расположении некоторых объектов, пользуясь чувством слуха и чувством обоняния. Особое чувство равновесия позволяет человеку ощущать пространственную ориентировку своего тела в гравитационном поле.

Надо заметить, что некоторые животные имеют и несколько иные, чем человек, биологические аппараты для ориентировки в пространстве. Так например, летучая мышь, двигаясь в темноте среди множества предметов, не наталкивается на них только потому, что пользуется для обнаружения этих предметов средствами ультразвуковой локации. Не исключена возможность, что некоторые глубоководные рыбы, а может быть и другие животные, имеющие специальный электрический орган, пользуются

электромагнитным излучением для пространственной ориентировки и обнаружения объектов среди вечного мрака морских пучин (движущийся электрический заряд такой рыбы должен создавать вокруг нее электромагнитное поле, которое взаимодействует с окружающими предметами).

Необходимость пространственной ориентировки в специфических условиях вызвала у разных животных биологически целесообразное развитие соответствующих органов чувств. У ночных птиц, таких, как сова или филин, особенность видения в сумерках обеспечена особо развитой чувствительностью глаз. У других животных и птиц, как например у орла, сильно развита острота зрения, помогающая им различать нужные объекты с больших расстояний.

Человек имеет биологически высокоразвитые органы чувств, которыми он пользуется для выяснения пространственных характеристик окружающего мира. Сознание человека позволяет ему на основе ощущений, получаемых от органов чувств, строить достаточно отвлеченные пространственные представления.

Наиболее полную информацию об окружающем пространстве человеку дает зрение, более скудные сведения он получает через осязание. Но не всегда человека удовлетворяют непосредственные сведения о пространстве, даваемые его органами чувств. Так, например, для получения более подробных пространственных характеристик наблюдаемых объектов человек пользуется очками, биноклем, микроскопом или телескопом, в зависимости от того, интересуют ли его тонкие подробности пространственного строения малых объектов или подробности строения очень удаленных или космических объектов.

В последнее время человек все более и более совершенствует орудия для исследования окружающего пространства и получения подробной информации о пространственном строении объектов, недоступных прямому наблюдению глазами вследствие их малости или вследствие их большой удаленности. Широкое применение для этих целей получила электроника.

Специальные электронные и оптические приборы созданы для обнаружения невидимых или плохо видимых невооруженным глазом предметов. К такого рода приборам, позволяющим более точно определять удаленность и пространственное местонахождение предметов, относятся оптические дальномеры, радиоальтиметры, радиолокаторы, радиотелескопы, ультразвуковые локаторы и другие устройства. По идее действия многих из этих приборов похожи на действия слепого, ощупывающего окружающее пространство палкой.

Собственно установление пространственного положения объектов при помощи лучей (световых, ультразвуковых или радиолучей) основывается на определении того направления, которое занимает луч, идущий от прибора на объект или от объекта к прибору. Для определения же расстояния до объекта можно воспользоваться одним из двух методов. В одном случае удаленность объекта устанавливается путем измерения длины хода луча, направленного на этот объект. В другом случае расстояние до наблюдаемого объекта определяется по углу засечки двух лучей, направленных на объект с двух разных положений.

Рассмотрим несколько подробнее эти принципы. Чтобы измерить длину хода луча между прибором и объектом, надо, зная скорость распространения луча, определить время, затрачиваемое лучом на прохождение этого пути, или, зная волновую характеристику¹ излучения, определить число длин волн, укладывающихся на пути между объектом и прибором.

Определение длины хода луча по времени его прохождения от объекта до прибора обычно практикуется в радиолокаторах и в ультразвуко-

¹ Длину волны или частоту и скорость распространения излучения.

вых локаторов. Если от прибора из пункта A посылается в направлении объекта B луч, имеющий скорость c , и этот луч, отразившись от объекта, возвращается к пункту A с той же скоростью c через промежуток времени τ , то, естественно, за это время луч пройдет двойное расстояние между прибором и объектом, равное $2L$, которое может быть определено соотношением

$$2L = c\tau.$$

Соответственно расстояние до объекта определится величиной

$$L = c \frac{\tau}{2}.$$

Судить о времени пробега луча до объекта и обратно можно, отмечая моменты ухода и прихода к прибору начала или конца какого-то отрезка луча. В связи с этим при практическом осуществлении такого рода локации пользуются посылками к объекту коротких импульсов радио- или ультразвукового излучения, промежутки между отправкой и приемом которых и регистрируются. Системы таких локаторов называются импульсными.

Определение длины хода луча до объекта по числу длин волн, укладываемых на этом пути, применяется в радиоальтиметрах и локаторах непрерывного излучения.

Схема такого определения показана на рис. 1. Если излучение, направленное на объект, имеет постоянную частоту колебаний, то отраженная от объекта обратно часть излучения интерферирует с прямым излучением, образуя поле стоячих волн. Узлы стоячих волн располагаются по пути от объекта к прибору на равных расстояниях друг от друга, начинаясь у отражающей поверхности объекта, причем расстояние между узлами стоячих волн составляет половину длины волны излучения.

Если у пункта A прибор посылает в направлении к объекту B излучение с частотой f , то при скорости распространения, равной c , длина волны излучения определяется равенством

$$\lambda = \frac{c}{f}.$$

Очевидно, число узлов стоячих волн на пути L от A до B будет

$$n = \frac{2L}{\lambda} = \frac{2fL}{c}.$$

Следовательно, расстояние между A и B определится как

$$L = \frac{cn}{2f}.$$

Местонахождение узлов стоячих волн обнаруживается либо чувствительным приемником данного излучения, либо самим излучателем по изменению его сопротивления излучению.

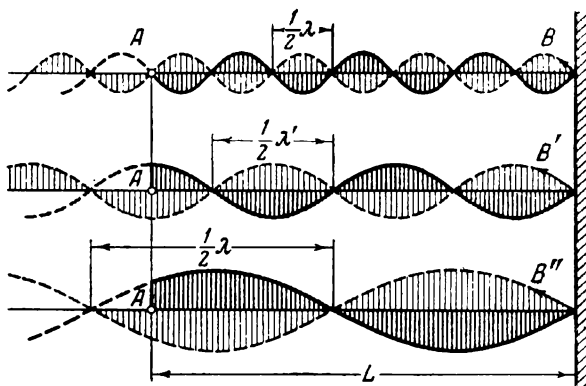


Рис. 1. Схема измерения расстояния между A и B по числу стоячих волн, укладываемых на этом расстоянии

Перемещая приемник или излучатель в направлении отражающей поверхности, можно по изменению амплитуды принимаемого сигнала определить количество стоячих волн между пунктами A и B .

Количество стоячих волн может быть подсчитано и другим путем. Не изменяя положения излучателя и приемника, можно уменьшить частоту колебаний в излучении. Тогда длина стоячих волн увеличивается, а узлы и пучности начинают проходить последовательно через пункт A , где расположен излучатель. Узлы стоячих волн проходят через пункт A до тех пор, пока длина волны не делается столь большой, что на промежутке

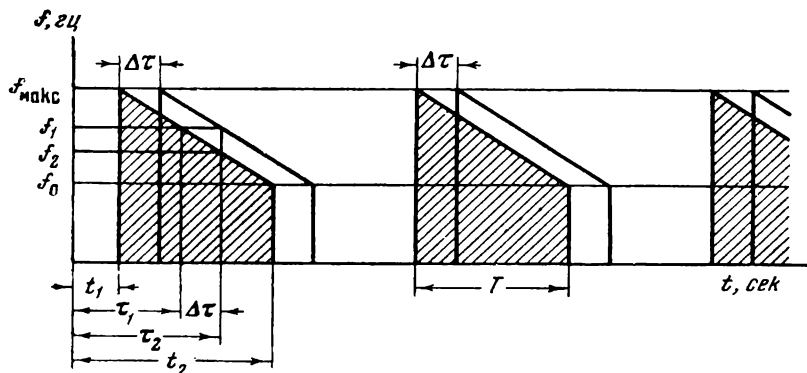


Рис. 2. Графическое изображение частотно-модулированных импульсов ультразвуковой локации

между A и B не останется ни одного узла. Подсчитав число узлов стоячей волны, прошедших через пункт A , за время изменения частоты f от начального значения до максимального, можно определить число полуволн, первоначально находившихся на этом участке.

Метод локации, дающий возможность распознавать удаленность препятствия по частоте биений прямого и отраженного излучения, в частности, используется и летучими мышами. Действие такой локации можно представить следующим образом.

Локационный аппарат периодически излучает ультразвуковые колебания с плавно меняющейся частотой от $f_{\text{макс}}$ до f_0 . Такие периодические послышки ультразвуковых импульсов графически изображены в виде зависимости частоты сигнала f от времени t (рис. 2). После отражения импульса от препятствия и возвращения его обратно около лоатора появляется эхо, в точности повторяющее импульс, посланный лоатором, но запаздывающий по времени. Очевидно, в любой момент времени, например τ , когда лоатор излучает колебания с частотой f_2 , к лоатору возвращается эхо-сигнал с частотой f_1 , которая излучалась на $\Delta\tau$ раньше, т. е. в момент времени t_1 . Принимаемые одновременно два сигнала с частотой f_1 и f_2 создают в приемнике комбинационные частоты $f_1 + f_2$ и $f_1 - f_2$. Обычно разностная частота $f_1 - f_2$ может легко детектироваться, так как лежит в области низких звуковых частот. Очевидно, разностная частота $f_1 - f_2 = \Delta f$ сохраняется постоянной для любого времени τ , если только сохраняется линейный характер изменения частоты лоатора и не меняется расстояние до отражающего сигнал препятствия. Зная скорость изменения частоты лоатора за период послышки импульса T и скорость распространения излучения c , можно расстояние до препятствия L определить из соотношений

$$L = c \frac{\Delta\tau}{2}$$

и

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta f} = \frac{t_2 - t_1}{f_{\text{макс}} - f_0} = \frac{T}{f_{\text{макс}} - f_0},$$

откуда

$$L = \frac{cT}{2(f_{\text{макс}} - f_0)} \Delta f.$$

Здесь частота биений Δf характеризует скорость прохождения узлов стоячих волн через приемное устройство. Это нетрудно заметить, обратив внимание, что число биений за один период изменения частоты от $f_{\text{макс}}$ до f_0 составляет $n = T\Delta f$.

Возможность определения пространственного удаления какого-либо предмета путем засечки двумя лучами одной из точек его поверхности вытекает из геометрической определенности решения такой задачи на плоскости. Действительно, если, как показано на рис. 3, направить из двух точек A и B , разделенных расстоянием b , на объект два луча, пересекающихся в точке C , то, зная расстояние b и зная углы α_1 и α_2 , можно легко определить любую из сторон l_1 и l_2 получившегося треугольника ABC . Длина этих сторон и представляет удаленность точки C соответственно от точек A и B , причем

$$l_1 = \frac{b \sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)},$$

$$l_2 = \frac{b \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}.$$

Аналогичным образом из треугольника ABC можно определить удаленность точки C от середины линии AB или удаленность по нормали от линии AB , т. е. вычислить медиану или высоту треугольника, опущенную из точки C на сторону AB .

Можно заметить, что величина углов α_1 и α_2 определяет не только удаленность данной точки предмета, но показывает и направление, в котором расположены точки в плоскости, заданной лучами. Однако, чтобы знать положение точки C в пространстве, необходимо дополнительно определить пространственную ориентировку самой плоскости ABC , например определив угол поворота ее вокруг оси AB . Другим способом для строгого определения положения в пространстве точки C может служить фиксация ее третьим лучом из точки, не лежащей в плоскости ABC , например из точки D , расположенной на высоте h над плоскостью ABC , как это показано на рис. 4.

Образующийся тетраэдр $ABCD$ строго фиксирует в пространстве положение точки C по отношению к трем точкам наблюдателя A , B и D . Зная взаимное расположение точек A , B и D , из которых направлены лучи l_1 , l_2 и l_3 , пересекающиеся в точке C , можно строго определить положение в пространстве точки C , например, величиной взаимно-перпендикулярных базисов b и h и величиной углов α_1 , α_2 и α_3 , образуемых лучами с направлением соответственных базисов. Для практического фиксирования лучами какой-либо точки C на поверхности объекта достаточно направить на эту поверхность только один луч, например из точки A ,

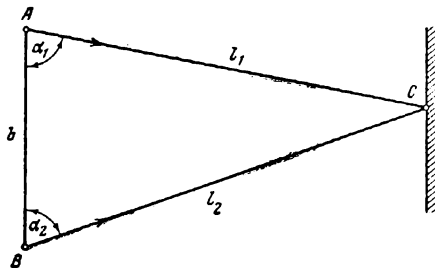


Рис. 3. Схема пространственной засечки объекта C двумя лучами из точек A и B

а в точках B и D можно фиксировать направление лучей, уже отраженных от точки C .

В том случае, если на поверхности объекта имеется характерная точка, отличающаяся по яркости от соседних участков поверхности, то, конечно, не обязательно посылать на объект вообще какой-либо луч, так как для построения пространственной картины можно фиксировать направления лучей, приходящих от этой характерной точки объекта. Такая система локации называется пассивной в отличие от активных систем, при которых объект облучается со стороны локатора. Активной системой биологического локатора можно считать, например, систему ультразву-

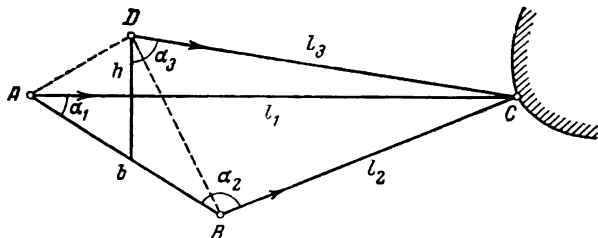


Рис. 4. Схема пространственной засечки объекта C тремя лучами из точек A , B и D

ковой локации летучих мышей. Зрение животных надо отнести к пассивной системе локации. Зрение человека, так же как зрение большинства животных, позволяет определять пространственное удаление наблюдаемых объектов путем засечки опорных точек поверхности объекта лучами с двух точек зрения — правого и левого глаза.

Направления приходящих лучей распознаются благодаря особенности устройства глаз. Наиболее просто выглядит система анализа направления приходящих лучей у насекомых, глаза которых имеют фацетное строение. Например, глаз стрекозы составлен из отдельных световоспринимающих трубочек, радиально расходящихся во все стороны (в каждую отдельную трубочку попадают лучи, приходящие только по строго определенному направлению).

Глаз человека представляет более совершенный прибор, напоминающий современный фотографический объектив. Такой зрительный аппарат позволяет значительно точнее определять направления приходящих лучей.

У некоторых древнейших животных определение положения наблюдаемых объектов осуществлялось пространственной засечкой тремя лучами. Представителем таких существ в наши дни является одно из пресмыкающихся, живущее в Новой Зеландии — гаттерия (*shpenodon punctatum*), которая имеет три глаза.

Человек и высшие животные обладают достаточно совершенным анализирующим аппаратом, позволяющим хорошо определять пространственную картину наблюдаемых объектов по засечкам лучей только с двух точек зрения. Надо заметить, что этот зрительный аппарат обладает еще одной замечательной особенностью — многоканальностью, которая дает возможность производить одновременную фиксацию и пространственное определение не одной точки наблюдаемого объекта, а целого многообразия точек и линий рассматриваемой поверхности объекта.

Но, пожалуй, самым замечательным свойством зрительного аппарата человека является автоматичность анализа сложной информации, получаемой совместно двумя глазами, для составления детальной пространственной картины. Синтезирование такой пространственной картины в мозгу происходит не моментально, а требует некоторого времени для своего построения. Динамика процесса возникновения пространственного образа в сознании человека особенно наглядно проявляется при рассмотрении незнакомого предмета. Читатель может наблюдать динамику этого процесса, рассматривая анаглифические рисунки, приводимые

на листах I, II. На эти рисунки надо смотреть через цветные анаглифические очки, приложенные к книге. При рассматривании каждого из этих рисунков одним глазом очень трудно определить пространственную форму изображенного на нем предмета. Однако при рассматривании двумя глазами через два светофильтра (разных цветов) постепенно начинает вырисовываться объемная картина изображенных предметов. Эта удивительная особенность получила название **стереоскопического эффекта**.

Особенностям зрительного аппарата, обуславливающим возникновение стереоскопического эффекта, посвящено дальнейшее изложение настоящей главы.

§ 2. УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Смотря на окружающие нас предметы, мы ясно представляем себе их взаимное размещение в пространстве, величину, объем, рельеф их поверхности и удаленность от нас. При этом нам кажется, что в нашем представлении вся совокупность сведений об окружающем нас пространстве возникает автоматически на основании полученных зрительных образов. Для получения представления об объемности и о пространственном расположении видимых предметов требуется известная работа нашего сознания. Эта работа нашим мозгом выполняется обычно рефлекторно, как бы автоматически, незаметно для нас.

Но так бывает не всегда. В этом легко убедиться. Зрительное восприятие человеком реальной пространственной природы отличается от восприятия изображения этой же природы, нарисованной в виде картины на плоскости. Рисунок, фотография, изображение на киноэкране не дают вполне реального ощущения глубины изображенного пространства. Хотя на плоском рисунке мы и различаем форму и относительную удаленность различных изображенных объектов, однако мы это делаем путем сознательного анализа изображения, которое представляется нам плоским. Плоское изображение мы учимся сознательно читать пространственным, так же как, рассматривая технический чертеж, сознательно определяем форму изображенных предметов и деталей. Пространственную же глубину реальной природы мы воспринимаем как нечто естественное подсознательно. По объему информации, позволяющей судить о пространственной глубине рассматриваемой картины, можно говорить о степени стереоскопичности (или о пластичности) изображения картины.

Слово **стереоскопия** происходит от греческих слов **стереос** (телесный, объемный) и **скопео** (смотрю, вижу) и означает зрительное восприятие телесности, объемности пространства. Поэтому слово «стереоскопия» употребляется обычно в смысле понятия рельефности, пластичности, объемности или пространственности зрительного образа видимых предметов.

Зрительное восприятие пространства далеко еще не изучено. Однако мы знаем теперь, что восприятие глубины наблюдаемого нами пространства не является прирожденным свойством нашего зрения, а приобретает в результате сознательного опыта.

Наиболее рано у человека возникает мускульно-осознательный опыт пространственной ориентировки. Первоначально зрительный образ предмета сам по себе не позволяет ребенку создавать пространственное представление об окружающем мире. Только сопоставляя видимые образы с мускульно-осознательным опытом, он учится судить уже по одному зрительному представлению о пространстве и расположенных в нем предметах.

Мышечное ощущение возникает у человека, когда он еще не умеет определять на глаз расстояния. Ребенок 4—5 месяцев часто тянется к

далекому предмету, который видит его глаза, но мышечное ощущение идущее от руки, «протестует» против напрасных усилий. В результате неоднократного повторения такого опыта у ребенка появляется первое представление об удаленных предметах.

Мышечное ощущение является главным контролером других органов чувств, в том числе зрения, в особенности в первый период жизни организма. Наше суждение о положении тела в пространстве и о движении его отдельных частей складывается не только из ощущений, получаемых вследствие раздражения мышечно-суставного аппарата, но также и тех раздражений, которые исходят от кожи.

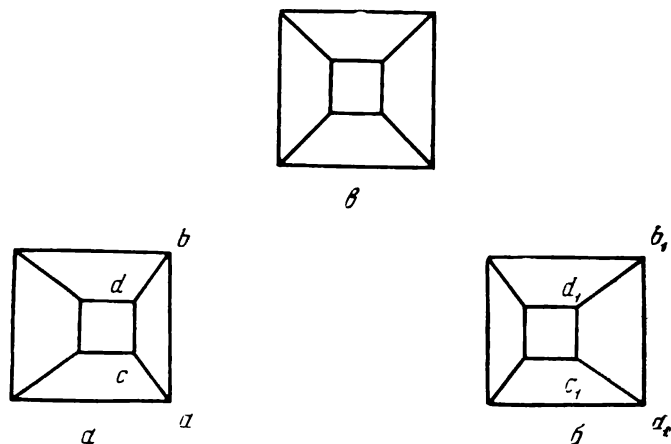


Рис. 5. Вид усеченной пирамиды, какой она представляется левому глазу (а), правому глазу (б) и вид пирамиды Γ (е), обращенной к нам усеченным концом

Можно заметить также, что слепорожденные, которым удавалось вернуть зрение, например, путем снятия катаракты, в первое время не могут по зрительным образам ориентироваться в пространстве. Такие лица вначале учатся определять формы видимых ими предметов, а уже затем только начинают оценивать расстояния до них.

Такое постепенное приобретение прозревшими способности зрительного восприятия пространства объясняется тем, что прозревший, сопоставляя свой мускульно-осозательный опыт с видимыми им предметами, обучается в конце концов судить о пространственном расположении и формах этих предметов только по получаемым зрительным впечатлениям.

Но иногда зрительное чувство само восполняет утраченное мышечное чувство. Примером этому могут служить больные, страдающие нарушением координации движений, так называемой атаксией. Такие больные лишь с трудом удерживаются на ногах, стоят обычно широко расставив ноги, покачиваясь из стороны в сторону. Зрение, особенно двумя глазами, заменяет им утраченное мышечное чувство. Закрыв глаза, такой больной не может даже стоять на ногах, не говоря уже о том, что он не способен выполнить какое-либо сложное движение.

Зрительное представление о глубине пространства у человека особенно усиливается при наблюдении им предметов двумя глазами. Такое наблюдение двумя глазами называется б и н о к у л я р н ы м зрением (от латинских слов: bin — два, oculus — глаз). При наблюдении предмета двумя глазами человек видит одним глазом предмет несколько с иной точки зрения, чем другим глазом.

На рис. 5 представлены три фигуры усеченных пирамид. Верхняя фигура представляет вид такой пирамиды, обращенной к нам усеченным

концом. Правый нижний рисунок дает изображение этой пирамиды, каким видит ее правый глаз, а нижний левый рисунок показывает, как видит эту пирамиду левый глаз. В результате зрительного объединения обоих последних изображений пирамида представляется нам рельефной. В этом легко убедиться. Достаточно каким-либо способом устроить так, чтобы правый глаз видел только правое изображение пирамиды, а левый глаз — только левое. Проще всего это можно сделать, рассматривая нижние изображения на рис. 5 несколько скопленными глазами. Но можно

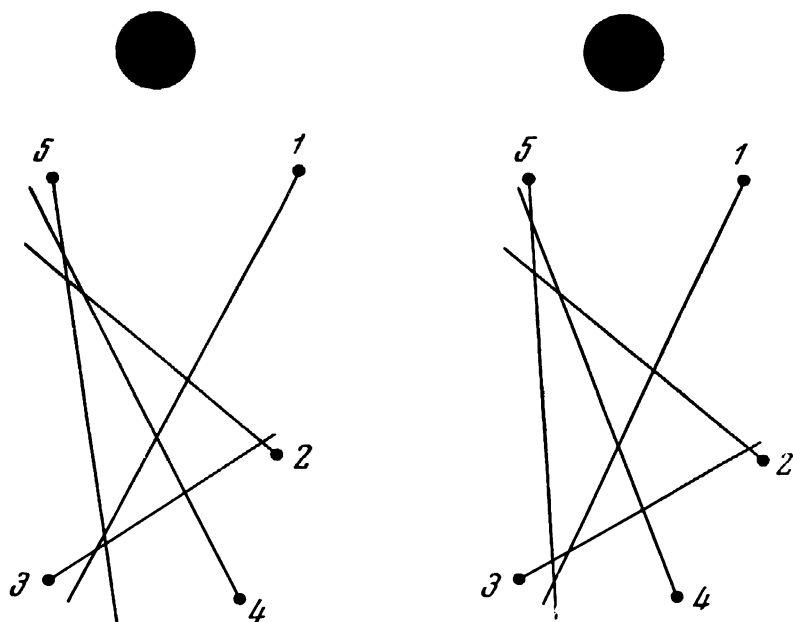


Рис. 6. Рисунок, помогающий научиться рассматривать стереоскопические изображения без стереоскопа

для облегчения раздельного наблюдения этих изображений воспользоваться оптическим прибором, называемым **с т е р е о с к о п о м**.

Для непосредственного рассматривания каждым глазом своего изображения нужен известный навык в скашивании глаз. Приобрести такой навык можно, например, рассматривая рис. 6, на котором изображены два черных пятна. Если на этот рисунок смотреть слегка разведенными глазами, т. е. как бы пытаться смотреть вдаль сквозь рисунок, то черные пятна начинают постепенно плыть друг к другу, пока не сольются в одно пятно. Повторяя такой опыт, можно научиться зрительно соединять два раздельных изображения в одно общее. После этого опыта можно попытаться посмотреть таким же образом на парные изображения, представленные на рис. 5. Рассматривая два нижних изображения, мы рельефно увидим усеченную пирамиду.

Такое зрительное представление об объемности предметов, их телесности и пространственном расположении называется собственно **стереоскопическим восприятием**, а видимое пространственное изображение — **с т е р е о с к о п и ч е с к и м и з о б р а ж е н и е м**. Сами же парные изображения называются **с т е р е о г р а м м о й** или **с т е р е о с к о п и ч е с к о й п а р о й** изображений.

Благодаря бинокулярному зрению человек может достаточно хорошо разбираться и оценивать пространственную глубину видимых предметов.

Такое представление у него является следствием работы сознания над слиянием двух несколько отличных друг от друга зрительных образов. Как мы уже упоминали, эта работа сознания возможна лишь на основании предварительного опыта, полученного человеком из сопоставления зрительных образов с мускульно-осозательными ощущениями.

Бинокулярное видение дает нам представление о глубине видимого пространства и объемности предметов, находящихся в нем, с очень большим совершенством. Однако не только благодаря бинокулярному зрению человек получает зрительное представление о глубине видимого пространства и объемности предметов, находящихся в нем. Стереоскопическое восприятие обусловлено многими психофизиологическими факторами зрительного процесса.

Изображения, которые обеспечивают восприятие пространства с такой же степенью локализации глубины, как при естественном рассматривании реального пространства, называются *стереоскопическими*, *пространственными* или *объемными* изображениями. Изображения, обеспечивающие несколько меньшую степень локализации глубины изображенного пространства, обычно называются *рельефными* или *пластичными*. И, наконец, изображения с еще меньшей степенью локализации глубины пространства считаются *плоскими* изображениями.

Объемным, пространственным изображением предмета будет скульптура, объемный макет; плоским изображением — обычная фотография, плоский рисунок; к рельефному «пластичному» изображению можно отнести барельеф, некоторые кинематографические изображения и т. п.

Объемное изображение предмета может быть реальным (т. е. физической копией реального предмета) или мнимым, оптическим изображением, подобным видимому изображению предметов в зеркале. Оптическое пространственное изображение может быть искусственно создано в сознании наблюдателя без какого-либо построения объективного реально-пространственного изображения. Так, например, если каждому глазу наблюдателя дать возможность видения плоского изображения, сфотографированного соответственно с точки зрения правого и левого глаза, то в сознании наблюдателя оба изображения, суммируясь, воссоздадут пространственный образ.

Под стереоскопическими изображениями, как мы уже заметили, обычно и понимают пространственные изображения, искусственно воссоздаваемые таким путем в сознании наблюдателя. Примером создания пространственного образа в процессе психофизиологического синтеза двух плоских изображений, раздельно рассматриваемых каждым глазом, может служить формирование стереоскопического изображения при рассматривании в стереоскоп или скошенными глазами пары сопряженных изображений, приведенных на листах III, IV и V.

На примере этих изображений мы можем убедиться в том, что для восприятия объемности (пространственности) изображенных предметов не является непременно необходимым реальное, физическое существование пространственного образа этих предметов, поскольку такой образ возникает в сознании человека в результате психофизиологических ощущений, вызываемых также искусственно.

Возможность зрительного определения глубины пространства обуславливается работой головного мозга. В формировании суждения об объемности пространства участвуют различные факторы стереоскопического видения. Их можно было бы разбить на ряд чисто психологических факторов (обуславливающих работу сознания при оценке глубины пространства по законам перспективы, загораживания одними предметами других и т. д.), на основные психофизиологические факторы (бинокулярное зрение, пространственно-временные параллаксы), а также на второстепен-

ные физиологические факторы стереоскопического видения (аккомодация, конвергенция и т. д.).

В зависимости от того, какие из факторов стереоскопического видения участвуют в процессе построения зрительного пространственного образа, различают бинокулярное и монокулярное стереоскопическое видение. Под стереоскопическим видением понимают бинокулярное видение, т. е. видение двумя глазами. Сопутствующий ему фактор «бинокулярного стереоэффекта» является наиболее мощным фактором, обуславливающим подсознательное восприятие пространственной глубины. К монокулярному стереоскопическому видению относят видение одним глазом, при котором в построении пространственного образа не участвуют конвергенция глаз и «бинокулярный стереоэффект». Так как при монокулярном видении в результате действия всех остальных факторов стереоскопического видения глубина рассматриваемого пространства может определяться достаточно совершенно, то говорят в этом случае о монокулярном стереоэффекте или о пластике монокулярно рассматриваемой картины.

§ 3. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЗРИТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Глаз человека является высокоразвитым и совершенным органом зрения. В то время как простейшие виды органов зрения, представляющие собой отдельные светочувствительные клетки, разбросанные в наружных покровах животного, позволяют только ощущать световые раздражения, глаз человека позволяет различать еще и формы находящихся перед глазом предметов.

Глаз человека развивается из нервной ткани, дающей начало головному мозгу. Он представляет собой как бы часть мозга, выдвинутого наружу. На рис. 7 изображен общий вид правого и левого человеческого глаза в горизонтальном разрезе. Глаз имеет приблизительно форму сферы диаметром около 25 мм. Стенки глазного яблока состоят из нескольких оболочек, внешней из которых является белковая оболочка, называемая склерой. Плотная склера защищает глазное яблоко от внешних воздействий. Движение глазного яблока осуществляется при помощи прикрепленных к склере шести мышц, в число которых входят четыре прямые и две косые мышцы. Центр вращения расположен на расстоянии 15,5 мм за передней поверхностью глазного яблока и на расстоянии 9 мм от задней стенки. При бодрствовании человека глаз все время находится в движении.

В передней части глазного яблока склера переходит в прозрачную роговую оболочку (см. рис. 11). За этой оболочкой на небольшом расстоянии находится радужная оболочка, которая бывает окрашена пигментом в голубой, коричневый или другой оттенок, придающий глазам людей различные цвета. В середине радужной оболочки имеется отверстие, называемое зрачком. Зрачок может сужаться или расширяться в зависимости от удаленности или яркости рассматриваемых предметов. Диаметр зрачка определяет эффективное отверстие оптической системы глаза. Обычно он равен 3—4 мм. При сильном освещении зрачок рефлекторно суживается, доходя до 2 мм, а при слабом освещении расширяется, доходя иногда до 8 мм; этим отчасти регулируется количество света, попадающего в глаз при разных освещенностях.

Зрачок суживается также при рассматривании близких предметов и расширяется при рассматривании удаленных предметов. Непосредственно за зрачком расположен хрусталик, представляющий собой прозрачное тело, выполняющее роль линзы глаза. Хрусталик имеет сложное строение; он состоит из кольцеобразных слоев, а клетки, его составляющие, вытянуты в радиальном направлении и образуют так называемую

звезду хрусталика. Такое строение делает хрусталик превосходным оптическим инструментом.

Пространство между роговой и радужной оболочками носит название передней камеры глаза; пространство за радужной оболочкой до хрусталика называется задней камерой. Оба эти пространства заполнены водянистой влагой. Пространство же самого глазного яблока заполнено совершенно прозрачной студенистой массой, называемой стекловидным телом. Преломляющие прозрачные среды глаза действуют как фотографический объектив, фокусируя на дне глаза лучи, идущие от предметов. При этом на дне глаза получается перевернутое

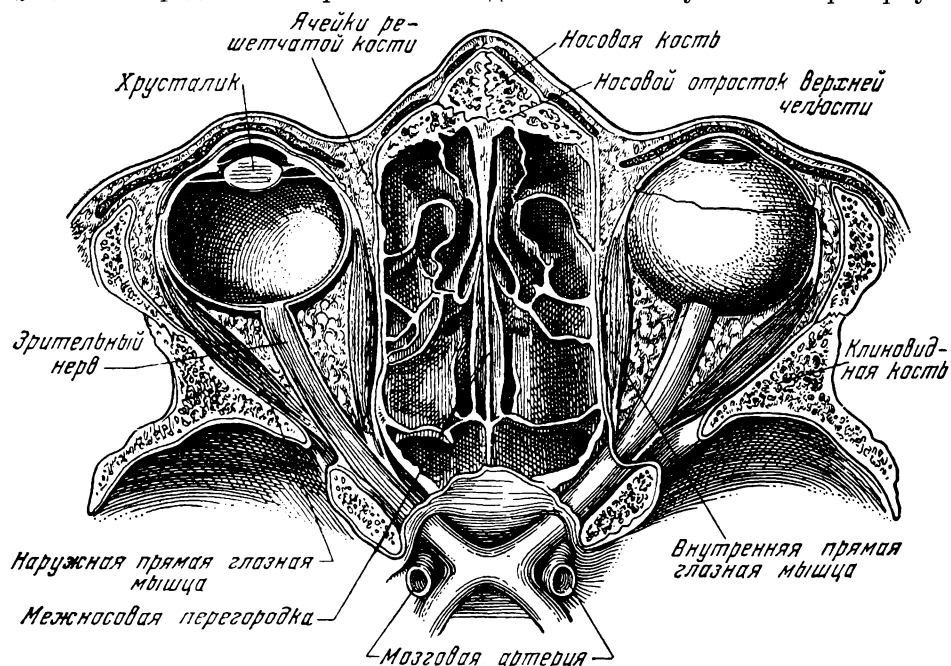


Рис. 7. Общий вид правого и левого глаза в горизонтальном разрезе. Глазное яблоко левого глаза показано в разрезе

изображение рассматриваемого предмета. Изображение оказывается перевернутым сверху вниз и справа налево по сравнению с наблюдаемым предметом.

Светощущающей частью глаза является сетчатка. Она представляет собой разветвление по дну глаза концевых аппаратов зрительного нерва и состоит из сцепления трех рядов нервных клеток, образующих со своими отростками десять слоев. Волокна зрительного нерва разветвлены по всей внутренней поверхности сетчатки; они прозрачны, нечувствительны к свету и являются лишь проводниками раздражений.

Собственно, светощущающими элементами сетчатки являются палочки и колбочки, присоединенные к концам волокон зрительного нерва. В палочках и колбочках различают наружные и внутренние членики. Диаметр внутреннего членика палочек около 1 мк, а длина всей палочки около 60 мк. Диаметр внутреннего членика колбочки около 6—7 мк. Длина колбочки около 35 мк. Общее количество палочек в сетчатке достигает примерно 130 млн., а колбочек около 7 млн. В средней части сетчатки преобладают колбочки, а на периферии — палочки. В наружных члениках палочек содержится светочувствительное вещество, называемое зрительным пурпуром или родопсином. В колбочках обнаружено присутствие незначительных количеств другого светочувствительного ве-

щества, имеющего сложную химическую структуру. Это вещество называется **и о д о п с и н о м**.

По главному дну разветвлены мельчайшие кровеносные сосуды, при помощи которых осуществляется питание всех тканей глаза. В том месте, где зрительный нерв входит в глаз, на поверхности глазного дна нет ни палочек, ни колбочек, и лучи, падающие в эту область, не вызывают ощущения света, вследствие чего эта область называется **слепым пятном** (см. рис. 11). В существовании слепого пятна легко убедиться, рассматривая правым глазом крестик, изображенный на рис. 8. Если при

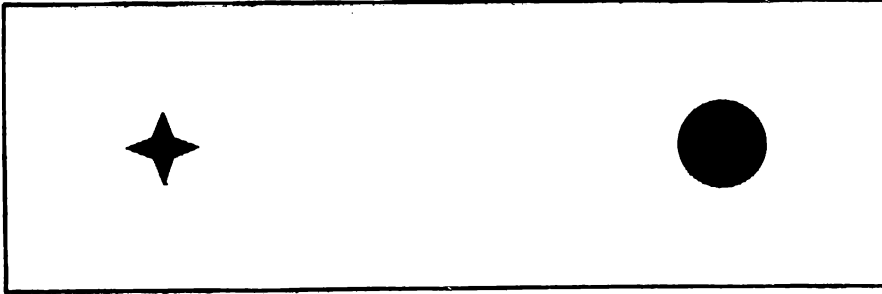


Рис. 8. Рисунок, позволяющий обнаружить наличие слепого пятна в глазу

этом закрыть левый глаз, то при определенном положении рисунка крестик, нарисованный справа от крестика, не виден, так как его изображение попадает на слепое пятно.

Область сетчатки, наиболее чувствительная к свету, лежит ближе к височной стороне глаза. Эта область наиболее ясного видения называется **желтым пятном**; она имеет овальную форму, вытянутую в горизонтальном направлении, и очень малые размеры: всего в поперечнике около 1 мм. Самой чувствительной частью желтого пятна является еще более узкая область, в которой сетчатка углублена и образует так называемую **центральную ямку** (fovea centralis), см. рис. 11. Горизонтальный диаметр этой области составляет около 0,3—0,4 мм, а вертикальный — около 0,2 мм. В этой области сетчатки палочки как будто совсем отсутствуют, а колбочки расположены наиболее тесно друг к другу и имеют утонченную, удлинненную форму. Диаметр их внутреннего членика здесь равняется 2,3 мм, а длина доходит до 0,1 мм.

В области центральной ямки каждая колбочка соединена с отдельным нервным волокном, а вне центральной ямки палочки и колбочки присоединяются группами к одному и тому же нервному волокну. В периферической области сетчатки количество палочек, присоединенных к одному общему нервному волокну, доходит до 80—100. Вследствие этого с помощью центральной части сетчатки, главным образом центральной ямки, глаз способен различать мелкие подробности тонкой структуры предметов. Зато периферические части сетчатки оказываются более чувствительными к свету, позволяя глазу наблюдать очень слабо освещенные предметы. Палочковым зрительным аппаратом глаз пользуется для видения в сумерках, а колбочковым аппаратом, занимающим центральную область сетчатки, — для видения днем при ярком освещении. Установлено также, что различение цветов способен осуществлять только колбочковый зрительный аппарат, а палочковый аппарат не способен различать цвета.

Нервные волокна, идущие от каждого глаза, собраны в три главных пучка. Один пучок заключает в себе волокна от внешней (т. е. височной) половины сетчатки, в которой расположены главным образом палочки, другой — от внутренней (т. е. носовой) половины сетчатки, в которой

также расположены палочки, и третий — от центральной области сетчатки, называемой **макулярной**, в которой преобладают колбочки.

Зрительные нервы обоих глаз частично перекрещиваются в так называемой **хиазме**. После перекрещивания нервные волокна от ви-

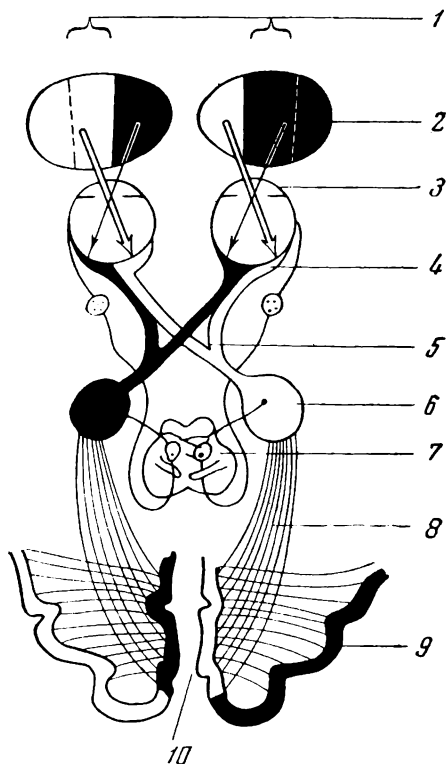


Рис. 9. Схема соединения зрительных нервов с головным мозгом. Лучи, исходящие от правой половины поля зрения, попадают и в правом и в левом глазу на окончания тех зрительных нервов, которые идут в левую половину коры головного мозга. Точно так же лучи, идущие от левой половины поля зрения, попадают в обоих глазах на участки сетчатки, соединенные с правой половиной коры головного мозга:

1 — макулярная область поля зрения; 2 — периферическое поле зрения; 3 — роговица; 4 — сетчатка; 5 — хиазма; 6 — подкорковые зрительные центры; 7 — двигательный центр глаза; 8 — волокна Грассиоле; 9 — корковые центры зрительной памяти; 10 — зрительная область коры головного мозга

сочных областей сетчатки направляются в соответствующие им мозговые полушария, а нервные волокна от носовых областей сетчатки — в противоположные полушария головного мозга. Схема соединения зрительных нервов с полушариями головного мозга показана на рис. 9.

Конечными центрами зрения в головном мозгу у человека являются затылочные доли коры большого мозга — места так называемой **борозды птичьей шпоры**. При разрушении этого участка коры у человека и у высших обезьян наступает полная слепота. У животных же, стоящих на более низких ступенях развития, реакции на световые раздражения сохраняются и после двухстороннего удаления затылочных долей коры головного мозга.

Определенные участки коры головного мозга связаны с вполне определенными участками сетчатки глаза. Причем более центральные места сетчатки с желтым пятном и центральной ямкой локализируются в более задних затылочных долях зрительной области мозга, чем краевые участки. Так как каждой точке на сетчатке соответствует вполне определенное направление приходящих в глаз световых лучей, то, очевидно, любому участку видимого поля зрения будет соответствовать вполне определенная (локализованная) область коры головного мозга. На рис. 10 показано примерное соответствие отдельных участков мозговой коры определенным участкам правой половины поля зрения.

Итак, конечным аппаратом нашего органа зрения являются затылочные доли коры головного мозга. Однако в формировании зрительных представлений, очевидно, участвует вся кора головного мозга. Сведения о предметах из зрительной области коры передаются (пока еще не совсем ясным путем) миллиардам других клеток мозга. Так, например, установлено, что в случае наблюдения незнакомых или необычных предметов сигналы зрительного образа достигают височных и лобных долей головного мозга.

Оптическая система глаза. Оптическая система глаза чрезвычайно сложна вследствие различной преломляющей силы отдельных слоев глаза и индивидуальных различий, характеризующих преломляющий аппарат глаза у различных лиц.

Ось симметрии глаза проходит через центр роговой оболочки и пересекает сетчатку приблизительно у носовой границы желтого пятна. Оптическая ось представляет собой центральную ось симметрии глаза. Луч, соединяющий фиксируемую глазом точку рассматриваемого предмета с местом наиболее ясного видения на сетчатке (с центральной ямкой) и проходящий через узловую точку, называется *визирной линией*; этот луч образует с оптической осью глаза угол приблизительно в $5-6^\circ$ (рис. 11).

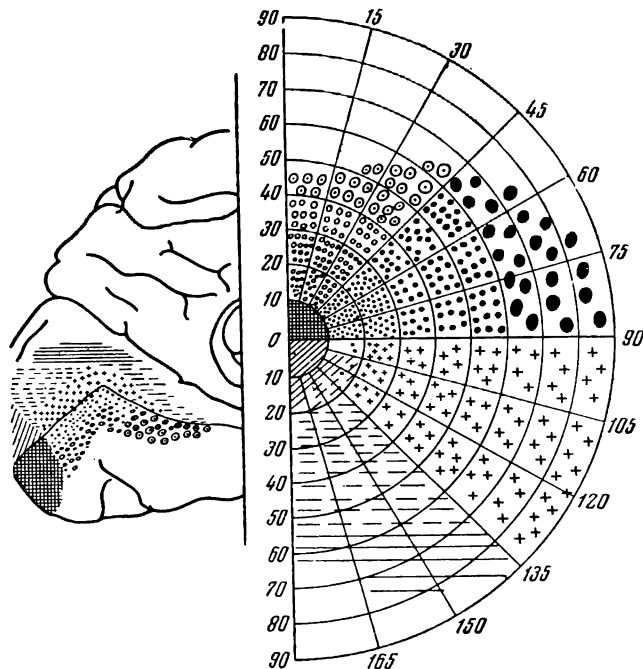


Рис. 10. Схема, показывающая, к каким участкам коры головного мозга приходят сигналы по нервным волокнам от тех или иных точек рассматриваемого пространства, находящегося в правой половине поля зрения

Оптическая система глаза не лишена ряда недостатков, к главнейшим из которых могут быть отнесены *сферическая* и *хроматическая* аберрации, *астигматизм*, *аномалии рефракции* и др. Сферическая аберрация глаза выражается в том, что при значительном отверстии зрачка лучи, идущие сравнительно далеко от оптической оси глаза, отклоняются сильнее параксиальных лучей и преломляются ближе, вследствие чего образуется некоторый кружок рассеяния, представляющий собой так называемую *восьмиконечную звезду аберрации*. Кружки рассеяния делают границу более темных и более светлых очертаний на сетчатке всегда размытыми, следствием чего является *иррадиация*, т. е. кажущееся увеличение белых объектов на черном фоне. Хроматическая аберрация глаза выражается в том, что лучи более коротковолновые (фиолетовые) фокусируются в глазу ближе длинноволновых (красных) лучей, вследствие чего на сетчатке образуются цветные кружки рассеяния. Астигматизм глаза обуславливает неодинаковость фокусировки горизонтальных и вертикальных линий, что зави-

сит от различия преломляющей способности различных сред глаза для разных его меридианов. Светорассеяние в глазных средах вызывает светлые ореолы, обнаруживающиеся при рассматривании ярких объектов на темном фоне.

Оптическая сила глаза должна обеспечивать, чтобы падающие на него параллельным пучком лучи при спокойном состоянии ресничной мышцы собирались в фокусе как раз на сетчатке. Если это удовлетворяется, глаз называется э м е т р о п и ч е с к и м, если не выполняется — а м е т р о п и ч е с к и м. Аметропия глаза может выражаться в том, что лучи фокусируются ближе сетчатки или за сетчаткой; в первом случае глаз называется близоруким, во втором случае дальнозорким.

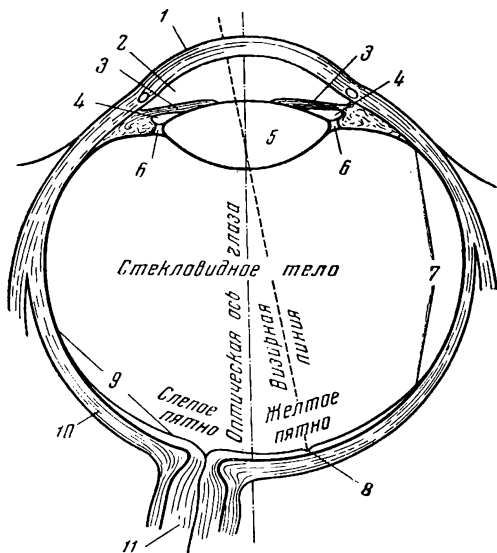


Рис. 11. Горизонтальный разрез правого глаза (оптическая система глаза):

1 — роговая оболочка; 2 — передняя камера; 3 — радужная оболочка; 4 — задняя камера; 5 — хрусталик; 6 — цилиарная связка; 7 — сосудистая оболочка; 8 — центральная ямка; 9 — ретина; 10 — склера; 11 — зрительный нерв

При спокойном состоянии ресничной мышцы, окружающей хрусталик, глаз различает наиболее удаленную точку, которая называется дальней точкой. Положение дальней точки характеризует аметропию глаза, равную $\frac{1}{R}$, где R — расстояние дальней точки от глаза. Для эметропического глаза дальняя точка лежит в бесконечности, так как в этом случае главный фокус глаза лежит на сетчатке. При рассматривании близких предметов ресничная мышца изменяет радиусы кривизны поверхностей хрусталика, чем изменяется оптическая сила глаза и достигается фокусирование изображения близкого предмета на поверхности сетчатки. Это явление изменения оптической силы глаза для получения резкого изображения предметов, находящихся ближе дальней точки, называется а к к о м о д а ц и е й глаза.

Отчетливое видение предметов на ближнем расстоянии осуществляется вследствие изменения кривизны хрусталика, преломляющего попадающие в глаз световые лучи. Достигается это изменение с помощью большого или меньшего натяжения капсулы, в которой находится хрусталик, ресничной мышцей, имеющей радиально расположенные волокна. В этих мышечных волокнах заложены многочисленные органы мышечного чувства (проприорецепторы), приходящие в возбужденное состояние при каждом изменении напряжения ресничной мышцы и, следовательно, при каждом изменении кривизны хрусталика, обеспечивающем аккомодацию. Нервные импульсы, поступающие в центральную нервную систему из проприорецепторов ресничной мышцы при аккомодации, до сознания не доходят, но на них основывается (рефлекторная) подсознательная оценка близких расстояний (до 5 м).

Каждому состоянию аккомодации соответствует определенная глубина поля зрения; предметы, находящиеся в ее пределах, могут быть видны отчетливо. Практически считают, что глубина пространства от 6 м до бесконечности может быть воспринята вполне отчетливо без изменения

аккомодации. Выделение предмета от других окружающих его предметов, от фона сопровождается в пределах аккомодации отчетливой видимостью данного предмета и одновременно размытостью, нерезкостью близлежащих предметов и нерезкостью удаленного фона. Чтобы отчетливо увидеть второй предмет, находящийся на ином расстоянии, требуется изменить силу аккомодации. Это сопровождается затратой некоторых психофизиологических усилий и мускульной работой, а весь процесс перевода взора от одного предмета к другому, более близкому, требует времени около 1 сек.; при переводе взора от близкого к более удаленному предмету изменение силы аккомодации происходит несколько быстрее. Аккомодационные усилия при переводе взора с одного предмета на другой вызывают в подсознании известное представление об удаленности того и другого предмета.

Конечное изменение кривизны хрусталика может происходить лишь в известных пределах; при этом ближайшую точку, которую благодаря аккомодации можно еще отчетливо видеть, называют ближней точкой глаза. Расстояние между дальней и ближней точками называется областью аккомодации. Различие оптической силы глаза при установлении на ближнюю и дальнюю точки называется мощностью аккомодации или объемом аккомодации. Объем аккомодации определяется так:

$$\text{Акк} = \frac{1}{p} - \frac{1}{R},$$

где p — расстояние от глаза до ближней точки, R — расстояние до дальней точки (в м); объем аккомодации (Акк) получается в этом случае в диоптриях.

Вследствие особой структуры сетчатки, состоящей из отдельных воспринимающих элементов, глаз не может различать очень мелких деталей, изображение которых на сетчатке имеет размеры меньше некоторого предела. Это происходит, когда угол зрения ω на объект уменьшается ниже определенной величины ω_0 , называемой физиологическим пределным углом.

Острота зрения обычно характеризуется тем минимальным промежутком между двумя объектами, который глаз в состоянии видеть; величина остроты зрения обратно пропорциональна предельному углу и измеряется как

$$V = \frac{1}{\omega_0}.$$

Разрешающей силой оптической системы глаза считают минимальный угол, при котором различимы отдельно две точки. Величина этого угла для нормального глаза обычно определяется равной $1'$. Разрешающая сила глаза ограничивает возможность наблюдения очень мелких деталей. Наглядной иллюстрацией этого может служить любой полиграфический рисунок, при рассматривании которого с достаточного удаления отдельные точки перестают быть различимыми и сливаются в общий фон серого цвета. На использовании этого свойства зрения основывается все воспроизведение полустоновых изображений полиграфическими средствами.

Острота зрения повышается при освещении однородным монохроматическим светом. В зависимости от длины волны света острота зрения изменяется незначительно. Так как в основе остроты зрения лежит контрастная, т. е. различительная, чувствительность глаза, то чем больше контраст двух смежных различаемых полей, тем больше и острота зрения.

Предельный угол остроты зрения для области наилучшего зрения в нормальных условиях для различных лиц сильно разнится. Есть лица, которые различают белый квадрат на черном фоне, если сторона квадрата видна под углом в $18''$, а черный квадрат на белом фоне — со стороны в $35''$ и меньше. Особенно велика острота зрения при оценке смещения

одной половины прямой линии по отношению к другой. Нормальный глаз различает относительное смещение отрезков с точностью до расстояний, видимых под углом в $10-12''$; при некотором навыке линии могут быть приведены в совмещение с погрешностью, не превышающей $2-3''$.

По мере того как изображение предмета перемещается в сторону от желтого пятна сетчатки, впечатление четкости изображения уменьшается, а вместе с тем падает и разрешающая сила оптической системы глаза. Малая чувствительность областей сетчатки, лежащих вне желтого пятна, может быть объяснена сильным разветвлением нервных волокон в этой части сетчатки, вследствие чего несколько палочек и колбочек могут передавать раздражение одному и тому же нервному волокну. Следовательно, два и более различных изображения на сетчатке в этой области могут вызвать одно зрительное ощущение.

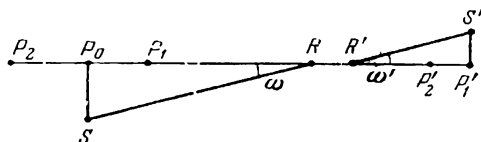


Рис. 12. Оптическая схема, поясняющая определение оптической глубины глаза

Острота зрения имеет большое значение для восприятия глубины пространства. Если глаз аккомодирован на какую-либо плоскость, то все объекты, лежащие в этой плоскости, будут получены на сетчатке с наибольшей резкостью. Все точки объектов, не лежащих в этой плоскости, дадут на сетчатке некоторые кружки рассеяния, вследствие чего изображение этих объектов будет получено нерезким. Однако кружки рассеяния, радиусы которых меньше некоторой величины r_0 , принимаются глазом за резкие изображения точки. Вследствие этого не только плоскость, но и некоторая часть пространства перед и за этой плоскостью может давать изображения, которые будут казаться резкими. Это явление и определяет глубину пространства, изображаемого на сетчатке глаза.

Глубина аккомодации глаза определяется как величина, обратная расстоянию между дальней P_2 и ближней точкой P_1 глубины предметного пространства; отрезок прямой P_2P_1 называется линией аккомодации (рис. 12). Обозначим расстояния до точек P_1 и P_2 от центра R входного зрачка через p_1 и p_2 , тогда линия аккомодации P_2P_1 определится как $p_2 - p_1$. Пусть глаз аккомодирован на точку P_0 , удаленную от R на расстояние P в диоптриях (дальняя и ближняя точки глубины удалены от P_0 на расстояние, которое можно выразить в диоптрийной величине, как T). В этом случае диоптрийная удаленность точек P_1 и P_2 следующая: $P_1 = P + T$ и $P_2 = P - T$, а полный объем глубины будет $2T = P_1 - P_2$, который (как и объем аккомодации) будет выражен в диоптриях и для каждого отдельного человека имеет определенную индивидуальную величину.

Диоптрийная глубина может быть определена по формуле

$$T = \frac{\omega_0}{d},$$

где ω_0 — физиологический предельный угол остроты зрения, d — диаметр зрачка.

Обычно значение предельного угла в одну угловую минуту (ω_0) принимается равным $0,00029 \text{ рад}$; следовательно, диоптрийная глубина при диаметре отверстия зрачка $d = 4 \text{ мм}$ равна

$$T = \frac{0,00029}{0,004} \approx \frac{1}{14} \text{ диоптрий}^1.$$

¹ Диоптрией называется единица измерения оптической силы прибора, обратно пропорциональная фокусному расстоянию, выраженному в метрах.

При этих условиях, если глаз, например, аккомодирован на расстояние 25 см (расстояние при чтении), то $p_2 = 25,5$ см, $p_1 = 24,5$ см, линия аккомодации имеет длину $p_2 - p_1 = 10$ мм. Если глаз установлен на бесконечность, то $P_1 = T$, и, следовательно, $p_1 = 14$ м. Таким образом, глаз, установленный на бесконечность, вследствие существования глубины аккомодации одновременно видит ясно все предметы, находящиеся дальше 14 м от него. Глаз же, аккомодированный на расстояние в 14 м, будет, очевидно, видеть отчетливо все предметы, удаленные от 14 м до бесконечности, и все предметы, удаленные от 14 до 7 м, т. е. в этом случае глаз без изменения аккомодации может с достаточной резкостью видеть все предметы, находящиеся в пространстве, удаленном от глаза на расстояние от 7 м до бесконечности.

Глубина аккомодации глаза растет не только при уменьшении зрачка, но также и при уменьшении остроты зрения, т. е. при увеличении предельного угла зрения, и имеет индивидуальное значение для разных лиц и разных условий зрительного восприятия.

Некоторые особенности зрительных восприятий и зрительных ощущений. Под действием световых раздражений в сетчатке происходят различного рода изменения. К главнейшим из таких изменений следует отнести выпячивание зрительного пурпура под действием света; укорочение колбочек и удлинение палочек вследствие изменений, происходящих в их внутренних члениках, и передвижение навстречу падению света между палочками и колбочками тонких отростков пигментного слоя. Опыты ряда авторов показали, что в глазе под влиянием светового раздражения появляются электродвижущие силы. Отрицательный заряд получают палочки и колбочки, а в отдельных волокнах зрительного нерва возникают электрические импульсы. В начале освещения частота этих импульсов зависит от яркости освещения; чем ярче освещение, тем больше частота импульсов. Однако при продолжительном освещении глаза источником света постоянной яркости частота импульсов постепенно уменьшается и останавливается на определенном уровне, соответствующем данной освещенности.

С помощью электрического микрозонда удалось зарегистрировать электрические импульсы в отдельных нервных волокнах глаза животных и человека. При этих исследованиях обнаружено, что максимальная частота импульсов в нервных волокнах возникает как в начальный момент освещения глаза, так и в момент выключения света. Чем выше яркость, тем чаще импульсы; они могут доходить до частоты примерно в 100 импульсов в секунду или даже больше. При очень малых яркостях частота, по-видимому, составляет всего лишь один импульс в одну или в две секунды.

Глаз способен ощущать световые раздражения самой различной силы и различного спектрального характера. Следует иметь в виду, что относительные яркости окружающих нас предметов отличаются друг от друга до миллиона раз, и все же глаз их способен различать. Глаз способен воспринимать световые излучения в области длин волн от 390 до 760 мкм. При больших яркостях человек может различать излучения с длиной волны до 860 мкм, более коротковолновые — с длиной волн до 317 мкм.

Свет различной длины волн вызывает ощущение цветности излучения. Соотношение между длинами световых волн и цветами, ощущение которых они вызывают, можно видеть в табл. 1.

Свет, представляющий смешанное излучение различных длин волн, лежащих в пределах видимого спектра, вызывает ощущение белого цвета. Ощущение одного и того же цвета может быть получено в результате смешения различных лучей. Различают два рода смешения цветов — аддитивное и субтрактивное. Аддитивное смешение цветов представляет собой суммирование цветных лучей, получаемое, например,

Таблица 1

Цвет							
красный	оранже- вый	желтый	желто-зеле- ный	зеленый	сине-зеленый	синий	фиолето- вый
Длина волны (λ , <i>ммк</i>), max							
760	620	590	560	530	500	470	430
Длина волны (λ , <i>ммк</i>), min							
620	590	560	530	500	470	430	390

при освещении одного экрана несколькими лучами разных длин волн. Субтрактивное смешение цветов представляет собой вычитание из одного цветного пучка лучей другого спектрального состава. Субтрактивное смешение цветов происходит, например, при наложении друг на друга двух цветных стекол. В этом случае из состава лучей, прошедших через первое стекло, вторым стеклом вычитается пучок лучей другой части спектра. Результаты аддитивного и субтрактивного смешения цветов получаются совершенно разные. Так, например, аддитивно смешивая желтый и синий лучи на экране, можно получить белый цвет с оттенками желтизны или синева, в зависимости от преобладания интенсивностей того или другого луча. Субтрактивно смешивая те же цвета, например, смешивая синюю и желтую краски, получают зеленый цвет. Результаты смешения цветов могут быть представлены графически. На рис. 13 представлен треугольник аддитивного смешения цветов, предложенный Максвеллом. Треугольник этот равносторонний. Каждая точка внутри его соответствует определенному цвету. Вершины треугольника соответствуют красному, зеленому и синему цветам. По сторонам треугольника отложены спектральные цвета, выраженные в длинах волн (*ммк*), в центре треугольника лежит область белого цвета. Соединяя прямой две точки, лежащие на сторонах треугольника, соответствующие цветам смешиваемых лучей, и деля полученную прямую на отрезки, пропорциональные интенсивностям этих лучей, находят точку, характеризующую получаемый цветовой тон и насыщенность его. Насыщенность цветного тона тем меньше, чем ближе этот цветной тон к белому. Цвета, кажущиеся нам более яркими, чем спектральные, так называемые пересыщенные цвета, лежат за пределами площади треугольника. Несуществующие в спектре пурпурные цвета помещаются на графике вдоль стороны, соединяющей красную и синюю вершины треугольника. Изучение законов смешения цветов привело к необходимости внести некоторые поправки к этому графику.

В настоящее время для определения цвета пользуются несколько измененным треугольником смешения цветов. Такой треугольник, принятый Международной осветительной комиссией для производства цветовых расчетов по так называемой колориметрической системе *XYZ*, представлен на рис. 14. Прямоугольный треугольник выбран для максимального упрощения цветовых расчетов, он позволяет выражать цветовой тон в декартовых координатах. Все реальные цвета в этой системе лежат внутри криволинейной фигуры и могут быть определяемы положительными координатами *X* и *Y*. Цветность белого равноэнергетического излучения *E* лежит в центре тяжести треугольника *XYZ* (на пересечении медиан), для которого $X = \frac{1}{3}$ и $Y = \frac{1}{3}$. Основные цвета *X*, *Y* и *Z*, как лежащие за пределами пространства реальных цветов, являются цветами символическими и служат лишь для выражения через них цвета смеси других цветов.

Цвет смеси каких-либо двух цветов изображается точкой, лежащей на прямой, соединяющей смешиваемые цвета. Цвет смеси каких-либо трех цветов будет изображаться точкой, лежащей внутри треугольника, в вершинах которого лежат смешиваемые цвета.

Уравнение, которым может быть определен каждый цвет через три основных цвета X , Y и Z , имеет следующий вид:

$$C = \alpha X + \beta Y + \gamma Z,$$

где α , β и γ — коэффициенты, выражающие количества трех цветовых компонентов. Ненасыщенные цвета образуются путем разбавления

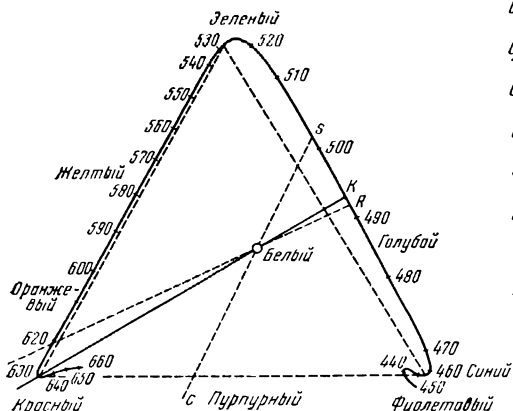


Рис. 13. Треугольник смешения цветов (по Максвеллу)

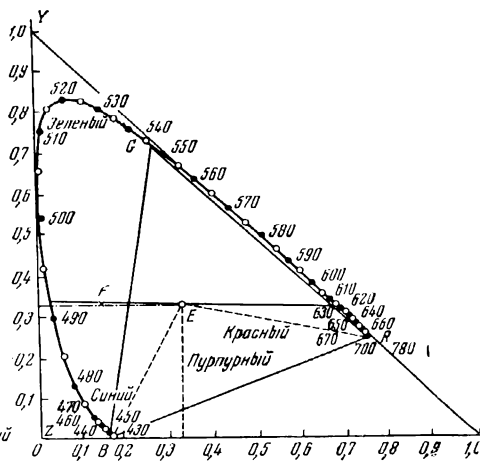


Рис. 14. Цветовой график XYZ

цвета C определенным количеством белого цвета. Два цвета, при смешении дающие белый цвет, называются дополнительными. Кривая дополнительных цветов может быть выражена эмпирическим уравнением

$$(\lambda - 559)(498 - \lambda_1) = 424,$$

где λ означает длину волны одного цвета, λ_1 — длину волны цвета ему дополнительного, выраженных в миллимикронах (м.мк.).

Видность света определяется как отношение видимой яркости к энергии спектральных лучей. При сумеречном зрении, когда работает почти исключительно палочковый зрительный аппарат, максимум видности смещается в сторону коротких длин волн. Этот эффект называется явлением Пуркина.

Чувствительность глаза к свету чрезвычайно велика; так, в совершенно темном помещении глаз может заметить свет яркостью в 10^{-6} лк. Для получения ощущения света необходимо, чтобы возбуждение сетчатки имело определенную длительность. При больших интенсивностях света эта длительность может быть очень малой. Для получения ощущения света необходимо соблюдать закон Бунзена — Роско: $It = A$. Здесь A — некоторая постоянная, равная произведению интенсивности раздражителя (I) на время его действия на глаз (t). Произведение It определяет нижний порог количества освещения глаза.

После того как глаз находился в темноте или при слабом свете, чувствительность сетчатки повышается. Это явление называется темновой адаптацией глаза (адаптацией к темноте). Чувствительность глаза вследствие темновой адаптации может увеличиваться в сотни тысяч раз.

По мере воздействия света на глаз чувствительность глаза понижается; это явление носит название *с в е т о в о й а д а п т а ц и и* (адаптации к свету). Процесс адаптации к свету позволяет глазу приспособливаться к весьма различным яркостям. Процессом адаптации отчасти управляют отростки пигментного слоя, которые под действием света удлинняются.

Чувствительность глаза к различию относительной яркости двух полей, т. е. контрастности полей, называется *р а з л и ч и т е л ь н о й ч у в с т в и т е л ь н о с т ь ю* глаза.

Если B — яркость одного поля и dB — наименьшее различимое увеличение яркости, то относительная величина необходимого изменения яркости dB называется разностным порогом раздражения. Постоянство разностного порога E в широких пределах известно как *з а к о н В е б е р а*. Заметное изменение ощущения dE определяется уравнением

$$dE = K \frac{dB}{B},$$

где K — коэффициент пропорциональности. Интегрирование этого отношения дает *з а к о н В е б е р а — Ф е х н е р а* $E = K \lg B + C$, который устанавливает, что интенсивность ощущения света растет пропорционально логарифмам раздражений.

При слабой освещенности глаз чувствительнее к контрастным изменениям в области коротких длин волн.

Световое раздражение глаза большой интенсивности вызывает болевое ощущение и носит название *в е р х н е г о п о р о г а*.

Процесс возникновения и развития зрительного ощущения протекает с известной скоростью. Возбуждение синим светом вызывает быстрое нарастание ощущения до максимальной величины. Действие зеленого света оказывается наименее резким, максимальное ощущение при этом достигается в продолжение $1/7$ сек.

Ощущение света пропадает не сразу после того, как прекращается действие света, но продолжает спадать конечное время. Зрительная инерция позволяет глазу суммировать яркость переменного светового возбуждения в том случае, если возбуждающие яркости представляют периодические колебания достаточной частоты. Ощущение, получаемое глазом от света, яркость которого меняется периодически с большой частотой, таково, как если бы на глаз действовал свет постоянной яркости, равной среднему значению яркости за один полный цикл. Этот закон может быть выражен математически как

$$It = \int_0^t i dt.$$

где I — кажущаяся фотометрическая яркость, t — период цикла, i — действительная фотометрическая яркость в каждый данный момент.

В силу зрительной инерции прекращение ощущения света запаздывает на короткий промежуток времени от прекращения светового возбуждения. Однако в целом ряде случаев после прекращения светового возбуждения через некоторое время в глазу возникает новое изображение, напоминающее по форме первоначальный объект. Если сетчатка подвергалась некоторое время адаптации к темноте, а затем подвергается на короткий срок действию яркого поля, то в глазу спустя малый промежуток времени возникает изображение, напоминающее по форме и цвету первоначальный объект. При этом, если возбудитель интенсивный, то оттенок может измениться на красный, зеленый и синий даже в том случае, если возбуждающий объект белого цвета. С течением времени изображение теряет свою форму. Это явление называется *п о л о ж и т е л ь н ы м п о с л е д у ю щ и м о б р а з о м*.

Если глаз после короткого светового возбуждения смотрит на серое поле, то возникает изображение первоначального объекта, окрашенное в цвет, дополнительный к цвету объекта. Если возбудитель белого цвета, то оттенки меняются. Это явление называется **о т р и ц а т е л ь н ы м** **п о с л е д у ю щ и м** **о б р а з о м**.

Сетчатку нельзя рассматривать как состоящую из ряда независимых приемников света, так как, действуя на одну ее часть, можно влиять на чувствительность другой ее части. Примерами такого действия могут служить явления ощущения контрастности в цвете или в яркости. Последовательность полос серого цвета, расположенных по убывающей светлоте, вызывает впечатление наличия темных границ полос вследствие субъективного восприятия контрастности на границе смежных полей. Цветной контраст выражается в том, что серое поле на цветном фоне приобретает окраску, близкую к дополнительному цвету.

В результате цветных контрастов можно получать ощущение цветов более насыщенных, чем те, которые наблюдаются в спектре. Чувствительность к контрасту центральной ямки зависит от возбуждения соседних областей сетчатки. При увеличении освещенности соседних областей чувствительность сперва возрастает, а затем, когда освещенность окружающих областей становится больше освещенности центральной части, падает.

Как мы уже отмечали, глаз является крайне подвижным органом чувств. Во время бодрствования человека он все время находится в движении. Исследования, проведенные А. Л. Ярбусом, показали, что движение глаза крайне существенно для функционирования зрительного восприятия. Оба глаза человека совершают постоянно согласованные движения, небольшими скачками прослеживая за наиболее существенными для наблюдения деталями рассматриваемого объекта. Причем согласованные движения глаза наблюдаются и при переводе взгляда на разноудаленные объекты и при наблюдении за движением объекта. Человек воспринимает зрительный образ только в том случае, если изображение рассматриваемой картины перемещается по сетчатке глаз. При фиксированной проекции неподвижного изображения на сетчатку глаз, как показывают опыты, зрительное восприятие фиксируемой картины исчезает.

§ 4. БИНОКУЛЯРНОЕ ЗРЕНИЕ И СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Важнейшей особенностью бинокулярного зрения является то, что при рассматривании предметов одновременно двумя глазами изображения, видимые правым и левым глазом, сливаются в одно пространственное изображение. Направление, в котором мы видим предметы одним глазом, определяется тем местом сетчатки, на которое падают изображения этих предметов. Каждая точка сетчатки локализует получаемое ею раздражение в определенном направлении поля зрения. При бинокулярном зрении направление видения предметов определяется линией, идущей как бы от одного «циклопического глаза», находящегося посередине между правым и левым глазом. Расстояние между центрами зрачков правого и левого глаз называется **н о р м а л ь н ы м** **с т е р е о с к о п и ч е с к и м** **б а з и с о м**. В зависимости от возраста и индивидуального телосложения межзрачковое расстояние у различных лиц колеблется в пределах от 52 до 74 мм. Однако в последующем изложении мы всюду будем понимать под нормальным стереоскопическим базисом среднюю величину, равную 65 мм. Схематично возникновение объемного видения при наблюдении предметов двумя глазами можно объяснить следующим образом.

При наблюдении двумя глазами мы видим каждую точку предмета на пересечении лучей, идущих от правого и левого глаза, как это показано на рис. 15. Когда мы смотрим на этот предмет только одним глазом,

то любую точку предмета A , B или C мы можем представить себе лежащей в направлении луча, проходящего через отображение этой точки на сетчатке глаза, но на совершенно неопределенном расстоянии от глаза. Однако если теперь этот же предмет мы будем рассматривать двумя глазами, то и для второго глаза соответственные точки предмета A , B , C будут лежать на продолжении лучей, проходящих через этот глаз. Пересечения соответствующих лучей, идущих в направлении от одного и другого глаза, будут строго определять положение рассматриваемых то

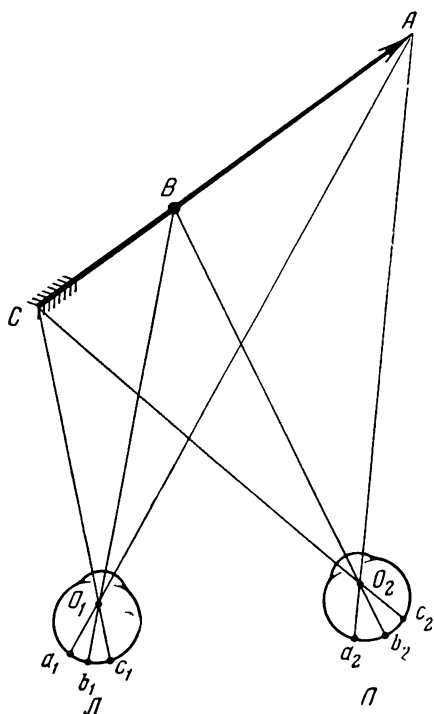


Рис. 15. Бинокулярный параллакс: односторонняя диспаратность раздражаемых мест сетчатки

чек предмета в пространстве. Естественно предположить, что мы о сопоставлении ощущений сможем осознать удаленность пересечения этих лучей и тем самым определить пространственное положение и удаленность точек предмета. Более строгое изложение причин возникновения пространственного образа при стереоскопическом видении дает теория корреспондирующих точек, которой мы коснемся в дальнейшем.

В том случае, когда в акте зрения участвуют оба глаза одновременно, расширяется поле зрения и, кроме того, видение двумя глазами позволяет заглядывать за края впереди стоящего предмета.

У некоторых животных поле зрения обоих глаз может достигать величины почти 360° , как например у зайца, но вследствие того, что поле зрения одного глаза почти не перекрывается полем зрения другого глаза, заяц лишен стереоскопического восприятия.

Поле зрения одного глаза у человека составляет по горизонтали приблизительно 150° и по вертикали 135° .

Границы поля зрения для различных цветов (красного, желтого, синего) при достаточно сильных раздражениях совпадают с границами для белого цвета; границы же видимости зеленого цвета на $20-25^\circ$ уже этих границ.

При бинокулярном видении поле зрения расширено по горизонтали на 30° и составляет около 180° , при этом поле зрения одного глаза только частично перекрывает поле зрения второго глаза, как это схематично изображено на рис. 15. Общее поле зрения, перекрываемое обоими глазами, составляет по ширине до 120° и по высоте до 135° . Предметы, находящиеся в этом общем поле зрения, видны одновременно и правым и левым глазом.

При рассматривании какого-либо предмета одновременно правым и левым глазом глазные яблоки поворачиваются так, что направление визирных линий каждого глаза определяется фиксируемой обоими глазами точкой, в которой пересекаются визирные линии правого и левого глаза. Это явление носит название *конвергенции*, а фиксируемая точка на предмете называется *центром конвергенции осей глаз*. Угол между визирными линиями того и другого глаза называется *углом конвергенции*. Очевидно, чем ближе фиксируемая точка, тем больше угол конвергенции, и, наоборот, при бесконечно большом удалении фик-

сируемой точки угол конвергенции равен нулю. При фиксировании ближней точки, удаленной на 150 мм, угол конвергенции глазных осей составляет около 23,5°.

Изменения аккомодации связаны с изменениями конвергенции, и, наоборот, каждое состояние конвергенции вызывает соответствующую степень аккомодации. Эта функциональная зависимость представлена на рис. 16. Для нормально-эметропического глаза ясное одиночное видение требует, чтобы каждому изменению аккомодации в одну диоптрию соответствовало изменение конвергенции глаз в односторонний угол, равный углу между визирными линиями глаза при удалении точки фиксации на 1 м. В спокойном состоянии, когда нет бинокулярно-фиксируемой точки, зрительные оси глаз не всегда устанавливаются в соответствии с этими требованиями. Конвергенция, определяемая естественным напряжением глазных мышц, называется *тонической*; конвергенция, вызываемая определенным напряжением аккомодации, называется *аккомодативной*, а разность между аккомодативной и тонической конвергенциями называется *фузионной* или *сливающей* конвергенцией.

На рис. 17 дана схема тонической (*m*), аккомодативной (*a*) и положительной фузионной (*φ*) конвергенций (очевидно, последняя может быть и отрицательной).

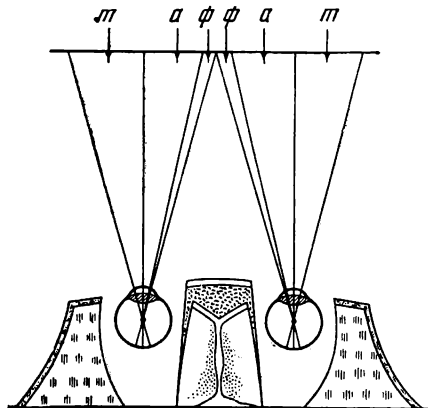


Рис. 17. Схема тонической (*m*), аккомодативной (*a*) и положительной фузионной (*φ*) конвергенции

Схематически можно себе представить такую картину. Каждая колбочка сетчатой оболочки одного глаза имеет в мозгу свою соответствующую корреспондирующую клетку, с которой она соединена обособленным нервным волокном. К каждой корреспондирующей клетке подходят два зрительных

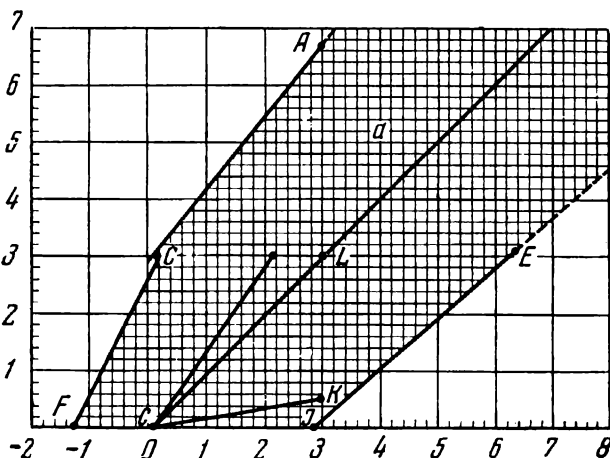


Рис. 16. Связь аккомодации с конвергенцией:
а — зона относительной аккомодации и относительной конвергенции

Если глаза не сведены на фиксируемом предмете, то изображение «двоится в глазах».

Когда же оси обоих глаз сведены на фиксируемом предмете, то психофизиологическое суммирование изображений, полученных правым и левым глазом, дает восприятие объемной трехмерной протяженности рассматриваемого предмета.

Причины возникновения пространственного образа при бинокулярном зрении с психофизиологической точки зрения еще не вполне выяснены.

Для практических целей удобно пользоваться объяснением причин пространственного видения, даваемых теорией корреспондирующих точек.

нервных волокна от соответствующих колбочек в одном и другом глазу. Таким образом, каждая колбочка одного глаза соответствует вполне определенной колбочке другого глаза. Для палочек одного и другого глаза такой взаимосвязи не имеется.

Вследствие наличия связи отдельных колбочек одного глаза с колбочками другого глаза каждая точка макулярной области сетчатки имеет соответствующую ей точку в макулярной области другого глаза. Эти соответствующие точки называются *к о р р е с п о н д и р у ю щ и м и*. Таким образом, корреспондирующими точками являются центры fovea centralis и все точки, лежащие на сетчатках в одном и том же направлении от центральных ямок и на одинаковом расстоянии.

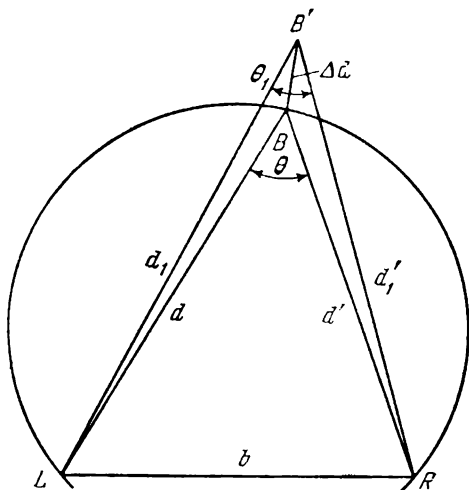


рис. 18. Гороптер и радиус стереоскопического зрения

различных цветов ввиду хроматической аберрации глаз. На рис. 18 окружность LBR изображает гороптер в сечении его плоскостью рисунка. L и R — точки зрения левого и правого глаза, конвергированных на точку B . Очевидно, по этим трем точкам L , R и B можно всегда легко построить поверхность гороптера для любого положения глаз (т. е. для любых условий конвергенции).

В том случае, если рассматриваемая точка B' лежит не на гороптере, изображение ее получается не на корреспондирующих точках сетчаток правого и левого глаза. В этом случае говорят, что изображение лежит на диспаратных точках сетчаток. Если *д и с п а р а т н о с т ь*, т. е. несоответствие раздраженных мест сетчаток, велика, то получается двоение видимого изображения; если же диспаратность невелика, то возникает ощущение пространственной удаленности точки B' от B . Диспаратность изображений на сетчатке глаз является причиной бинокулярного стереоэффекта, т. е. эффекта пространственного видения, проявляемого при бинокулярном зрении. При одновременном рассматривании разноудаленных предметов изображения, получаемые на сетчатках глаз, всегда попадают на диспаратные точки.

Смещение точки изображения в одном глазу относительно соответствующей точки изображения в другом глазу носит название *б и н о к у л я р н о г о* или *с т е р е о с к о п и ч е с к о г о* *п а р а л л а к с а*. Бинокулярный параллакс определяется разностью углов, образуемых в обоих глазах визируемыми линиями (см. рис. 15), идущими к фиксируемой точке B , лежащей в гороптере, и теми линиями, которые идут к сетчатке

При раздражении корреспондирующих точек обоих глаз возникает единичное изображение предмета. Для каждого положения глаз только вполне определенные точки внешнего пространства дают изображения на соответствующих им корреспондирующих точках. Геометрическое место точек внешнего пространства, которые дают изображения на корреспондирующих местах сетчатки, называется *г о р о п т е р о м*. Гороптер представляет собой поверхность сферы, и для различных положений глаз (различных поворотов глазных яблок) он различен. Также несколько различен гороптер для

через узловые точки глаза (O_1 и O_2) от рассматриваемого предмета, находящегося ближе C или дальше A точки фиксации.

Бинокулярный параллакс может быть выражен в угловом измерении, как дифференциальный или разностный параллакс, равный разности углов конвергенции LBR (рис. 18) и параллактического угла $LB'R$, обозначая которые соответственно θ и θ_1 можно написать, что дифференциальный параллакс равен

$$\Delta\theta = \theta - \theta_1.$$

Под остротой стереоскопического (бинокулярного) зрения обычно понимают величину предельного угла $\Delta\theta_0$ дифференциального параллакса, которую человек способен еще различить. Эта величина отлична от угла, определяющего разрешающую способность одного глаза, и сильно зависит от индивидуальных способностей человека к стереоскопическому видению пространства. Обычно предельную величину угла $\Delta\theta_0$ принимают для расчетов равной $30''$, хотя многие лица обладают значительно большей остротой стереоскопического зрения. Статистическое распределение остроты стереоскопического зрения, определенное на основе обследования 106 лиц, представлено графически на рис. 19.

Острота стереоскопического зрения для каждого человека в отдельности сильно зависит от яркости наблюдаемого объекта и от длительности

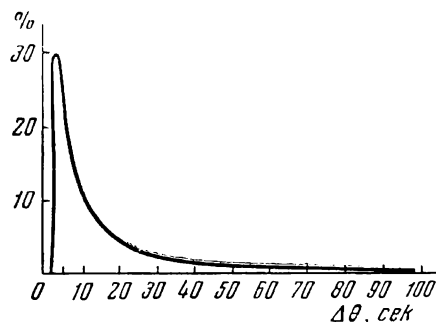


Рис. 19. Статистическое распределение стереоскопической остроты зрения

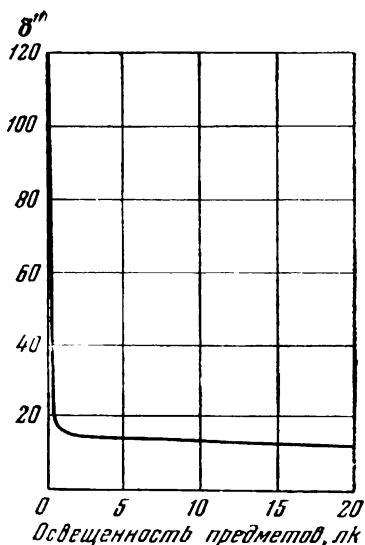


Рис. 20. Зависимость порога глубины зрения (δ'') от освещенности (E) фона

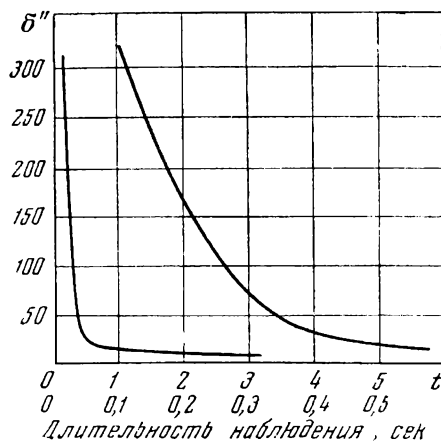


Рис. 21. Зависимость порога глубины (δ'') зрения от продолжительности наблюдения (t)

наблюдения. Опытные данные о зависимости остроты стереоскопического зрения от освещенности при наблюдении черных объектов на белом фоне (по данным Е. М. Белостоцкого) приведены на рис. 20. Зависимость порога стереоскопического зрения от продолжительности наблюдения (по Л. Н. Гассовскому и Н. А. Никольской) представлена на рис. 21.

Пороги стереоскопического восприятия почти не изменяются при яркости объектов от $3,8 \cdot 10^{-3}$ до $4,1 \cdot 10^{-5}$ стильб, как графически показано по данным В. Г. Самсоновой на рис. 22. При уменьшении яркости (левая часть кривой) или ее увеличении (правая часть кривой) пороги резко возрастают, т. е. стереовосприятие заметно ухудшается. Это в значительной мере объясняется тем, что при слабых яркостях работает в основном палочковый аппарат сетчатки, острота зрения при котором значительно уменьшается. Восприятие глубины пространства заметно ухудшается при уменьшении контрастов между объектом и фоном. Значительное влияние на остроту стереоскопического восприятия оказывает также отношение вертикального размера объекта к горизонтальному и длина периметра объекта. Радиус стереоскопического видения определяется как предельное расстояние, начиная с которого предметы, удаленные дальше вплоть до бесконечности, уже не различаются по удаленности друг от друга при помощи бинокулярного зрения. Предположим,

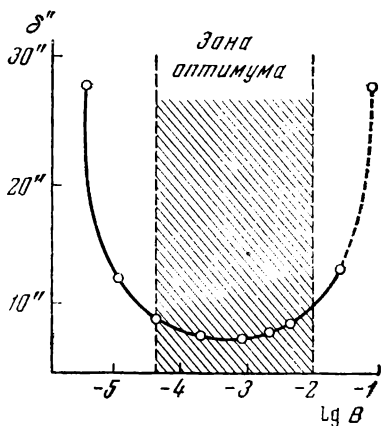


Рис. 22. График изменения порога стереоскопического восприятия (δ'') в зависимости от яркости (B) наблюдаемых предметов

что глаза фиксируют точку, удаленную в бесконечность, т. е. визирные линии обоих глаз параллельны, тогда предельный угол дифференциального параллакса $\Delta\theta_0$ определит радиус стереоскопического видения r_0 , как

$$r_0 = \frac{b_0}{\Delta\theta_0}.$$

Полагая нормальный стереоскопический базис $b_0 = 65$ мм, предельный угол $\Delta\theta_0 = 0,000029$ (т. е. равным $10''$), будем иметь радиус стереоскопического видения

$$r_0 = \frac{65}{0,000029} \text{ мм} = 1350 \text{ м.}$$

Очевидно, все предметы, удаленные от глаза больше, чем на 1350 м, при наблюдении их двумя глазами будут казаться на одном расстоянии, как и бесконечно удаленные.

Для лиц, обладающих остротой стереоскопического зрения в $30''$, радиус стереоскопического видения будет составлять 450 м, а для лиц, обладающих остротой в $5''$, радиус стереоскопического видения соответственно составит 2700 м.

Различимость рельефа (разноудаленность рассматриваемых предметов) определяется величиной дифференциального параллакса и удаленностью предметов. Из геометрических соотношений рис. 18 можно определить, что удаленность рассматриваемой точки B' от точки фиксации глаз B , лежащей на гороптере, по нормали к гороптеру, выражается уравнением

$$BB' = d_1 - d.$$

Считаем $d_1 = \frac{b}{\theta_1}$ и $d = \frac{b}{\theta}$, так как удаленность точки фиксации B значительна по сравнению с межзрачковым расстоянием b , тогда

$$BB' = b \left(\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta} \right).$$

Отсюда:

$$b\left(\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta}\right) = b \frac{\theta - \theta_1}{\theta_1 \theta} = \frac{b \Delta \theta}{\left(\frac{b}{d_1}\right)\left(\frac{b}{d}\right)} = \frac{\Delta \theta d_1 d}{b}.$$

Уравнение можно переписать в более простом виде:

$$d_1 - d = \Delta d = \frac{\Delta \theta (d + \Delta d) d}{b},$$

откуда

$$\Delta d = \frac{d^2 \Delta \theta}{b - d \Delta \theta}.$$

Наименьшая величина глубины рельефа Δd_0 , различимая при бинокулярном зрении, зависит от порога глубины $\Delta \theta_0$ и от удаленности рассматриваемых предметов d и может быть определена по формуле

$$\Delta d_0 = \frac{d^2 \Delta \theta_0}{b - d \cdot \Delta \theta_0},$$

где угол $\Delta \theta_0$ выражается в радианной мере. Отсюда видно, что различимость рельефа обратно пропорциональная Δd_0 уменьшается пропорционально квадрату расстояния наблюдателя от рассматриваемого предмета.

Для порога глубины $\Delta \theta_0 = 10''$ в табл. 2 показана в метрах различимость рельефа при различных удаленностях рассматриваемых предметов.

Т а б л и ц а 2

Удаленность от- правной точки сравнения x , м	Удаленность точки, отличаемой по глу- бине как более близ- кой y , м	Расстояния планов друг от друга, отли- чимых по глубине $x - y$, м	Относительная ве- личина различимой глубины планов $\frac{x - y}{x}$, %
∞	1340	∞	100
1000	450	550	55
500	340	160	32
200	172	28	14
100	93	7	7
50	48	2	4
20	19,7	0,3	1,5
10	9,92	0,08	0,8
5	4,975	0,025	0,5
2	1,997	0,003	0,15
1	0,9992	0,0008	0,08
0,5	0,4998	0,0002	0,04
0,2	0,19997	0,00003	0,015

Последняя графа таблицы показывает «тонкость» различения рельефа у объектов в зависимости от их удаленности от наблюдателя.

§ 5. ОСОБЕННОСТИ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО ВОСПРИЯТИЯ ПРОСТРАНСТВА

Бинокулярный стереоскопический эффект наиболее сильно проявляется лишь при рассматривании сравнительно близких предметов. В этом легко убедиться, например, рассматривая предметы, которые мы держим в руке, сначала двумя глазами, а потом одним глазом. Закрыв один глаз, мы ощущаем значительную потерю пространственной телесности рассматриваемого предмета. Прodelывая такой же опыт с рассматриванием предметов,

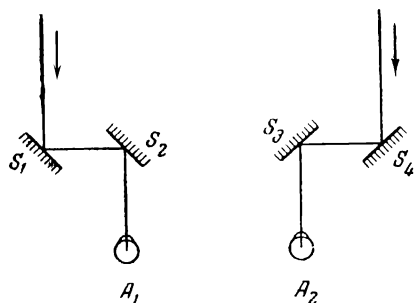


Рис. 23. Схема телестереоскопа

удаленных на несколько метров (например, находящихся в дальнем конце комнаты), мы уже не замечаем большой разницы во впечатлениях от рассматривания этих предметов одним или двумя глазами.

Сила стереоскопичности зависит от угла зрительного охвата боковых сторон рассматриваемого предмета или от разности смещения рассматриваемого предмета по отношению к фону. Чем ближе рассматриваемый предмет к наблюдателю, тем больше охватывает каждый глаз наблюдателя боковые стороны предмета. Очевидно, что для увеличения охвата боковых сторон рассматриваемого предмета нужно либо приблизить рассматриваемый предмет, либо рассматривать его глазами гиганта, т. е. глазами, раздвинутыми на большой базис. Оптическое приближение рассматриваемого предмета можно осуществить с помощью бинокулярных зрительных приборов, биноклей и т. п. Оптическое раздвижение точек зрения правого и левого глаза также может быть достигнуто искусственно.

Простейшим прибором, позволяющим увеличивать искусственно стереоскопический базис при нормальном рассматривании предметов, является телестереоскоп, схема которого изображена на рис. 23. Телестереоскоп состоит из четырех парных, параллельных друг другу зеркал S_1 и S_2 , S_3 и S_4 . Лучи света, идущие от рассматриваемых предметов, при помощи двукратного отражения направляются в оба глаза, A_1 и A_2 , наблюдателя. В данном случае стереоскопическим базисом рассматривания является расстояние $S_1S_4 = b$, которое значительно превосходит нормальное расстояние между глазами: $S_2S_3 = b_0$. Увеличение стереоскопического базиса до $S_1S_4 = nb_0$ расширяет границы стереоскопического видения, так как радиус стереоскопического видения в этом случае увеличивается в $n = \frac{b}{b_0}$ раз. Это отношение принято называть **удель-**

ной **пластикой** прибора. Призмный бинокль с увеличенным расстоянием между объективами можно считать также телестереоскопом, который составлен из двух телескопических систем с увеличением V . Так как такая система увеличивает в предметном пространстве все углы в V раз, то предельный угол различимости дифференциального параллакса $\Delta\theta_0$ будет уменьшен в V раз по сравнению со зрением невооруженными глазами и, следовательно, радиус стереоскопического видения увеличится в V раз.

Увеличение радиуса стереоскопического видения пропорционально оптическому увеличению, даваемому зрительным прибором, и величине стереоскопического базиса.

Общее увеличение радиуса стереоскопического видения выражается произведением $n \cdot V = \Pi$, которое называется *полной пластикой*.

При уменьшении стереоскопического базиса и оптическом уменьшении зрительного прибора соответственно уменьшается и радиус стереоскопического видения.

Усиление стереоскопического эффекта за счет искусственного увеличения стереоскопического базиса называется *гиперстереоскопией*. Гиперстереоскопия увеличивает границы стереоскопического видения и усиливает впечатление рельефа при рассматривании удаленных предметов; однако благодаря законам психофизиологического подравнивания при этом изменяется и кажущаяся масштабность предметного пространства. Психофизиологическое подравнивание в данном случае заключается в том, что на основе опыта человек приводит мысленно увеличенный радиус стереоскопического зрения к нормальной границе стереоскопического восприятия глубины пространства невооруженным глазом; а так как степень стереоскопичности изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния, то предметы с увеличенной степенью рельефа кажутся приближенными и соответственно уменьшенными.

Причины кажущегося приближения и уменьшения предметов при гиперстереоскопии могут быть поняты из рис. 24. При рассмотрении предмета A с увеличенного базиса F_1F_1 углы рассматривания предмета определяются размером и удаленностью его от точек наблюдения. Так как в действительности положение глаз соответствует нормальному базису FF , то углы θ , под которыми виден предмет, дадут кажущееся положение предмета в точке B , причем соответственно уменьшенных размеров. Наоборот, рассматривание предметов с уменьшенным стереоскопическим базисом сопровождается явлением кажущегося удаления и соответствующего увеличения рассматриваемых предметов.

На листе VI представлен ряд стереоскопических снимков, полученных при фотографировании с различными базисами (два верхних — 65 мм, средний — 100 мм, нижний — 130 мм). Рассматривая эти снимки в стереоскопе, можно получить представление о влиянии величины стереоскопического базиса на восприятие рассматриваемого пространства.

На примере этих рисунков можно заметить, что геометрия видимого пространства существенно отличается от геометрии действительного пространства. Если ab изображает нормальный базис невооруженных глаз (рис. 25), ac — гиперстереоскопический базис прибора, через который происходит рассматривание предметного пространства, то можно условно изобразить пространство, рассматриваемое с базиса ac , на чертеже в виде ряда следов, параллельных один другому и базису плоскостей с I до VII . Тогда пространство изображений, воспринимаемое с базиса ab , представится рядом плоскостей от I до 7 . Легко видеть, что это пространство получается, подобно первому, пропорционально уменьшенным во всех трех измерениях в отношении $\frac{ac}{ab}$.

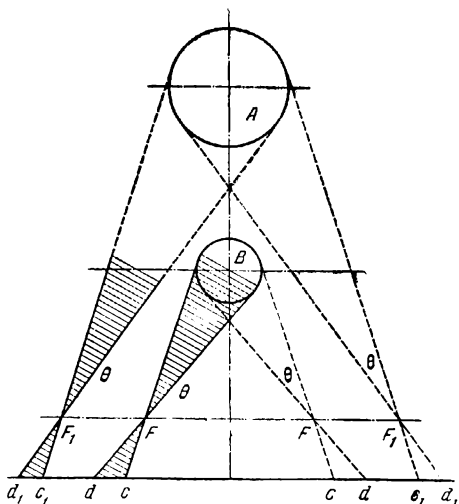


Рис. 24. Принцип гиперстереоскопии: cd и cd_1 — изображения объекта на сетчатках глаз

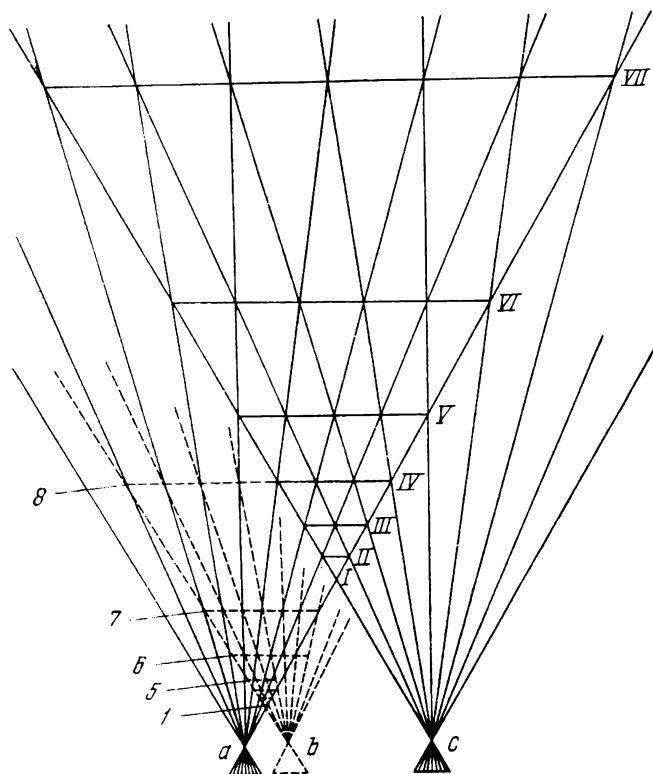


Рис. 25. Масштабное воспроизведение стереоскопического пространства

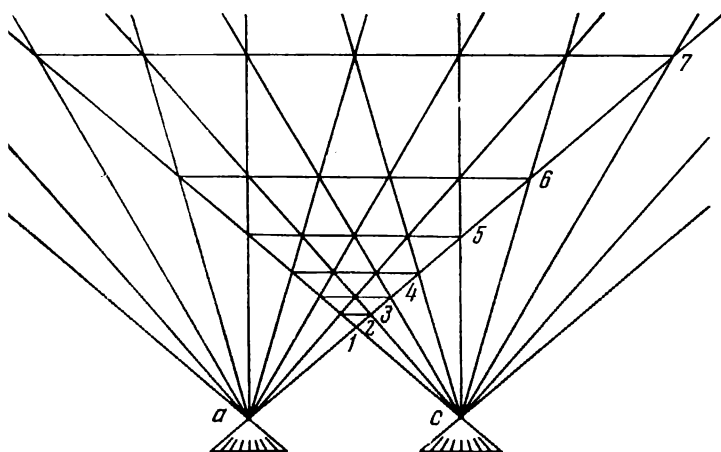


Рис. 26. Пространство, видимое через бинокль с двукратным увеличением и увеличенным базисом

На рис. 26 представлен случай наблюдения предметов в бинокулярную зрительную трубу с двукратным увеличением при сохранении увеличенного базиса ac . Все углы центральной проекции при этом получаются удвоенными, но вместо плоскостей $I-VII$ (рис. 25) мы воспринимаем плоскости $1-7$. Легко видеть, что эти плоскости расположены к наблюдателю вдвое ближе, чем плоскости $I-VII$, но линейные размеры их следов в плоскости чертежа остались без изменения.

Таким образом, простое увеличение рассматриваемого изображения без изменения базиса вызывает уменьшение глубины пространства, пропорциональное этому увеличению. Если мы от одного базиса переходим к другому, меньшему, чем первый, и вводим еще увеличение, меньшее единицы, то получаем обратную картину. Табл. 3 дает наглядное представление о действии изменения базиса и увеличения прибора для восприятия пространства.

Уменьшая базис между точками зрения правого и левого глаза, можно прийти к положению, когда точки зрения правого и левого глаза совпадут. В этом случае действие бинокулярного стереоэффекта будет устранено, рельеф же и глубина рассматриваемого пространства будут определяться исключительно влиянием вторичных факторов стереоскопического видения. Такое восприятие пространства называется псевдоскопическим.

При взаимном перемещении точек зрения правого и левого глаза так, что правый глаз наблюдателя начинает видеть с точки зрения левого глаза, а левый глаз — с точки зрения правого глаза, получается эффект псевдоскопии. Он может быть получен с помощью прибора, называемого псевдоскопом (рис. 27), или при рассматривании стереоскопических изображений в обычном стереоскопе, когда правое изображение стереопары поставлено перед левым глазом, а левое — перед правым.

Псевдоскоп устроен таким образом, что правый глаз R наблюдателя смотрит на предмет через систему зеркал A_2 и B_2 , а левый глаз L — через систему двух зеркал A_1 и B_1 , плоскости которых параллельны одна другой.

В этом случае зрительные оси правого и левого глаза оказываются взаимно перенесенными с одной стороны на другую.

Псевдоскопическое рассматривание предметного пространства вследствие бинокулярного стереоэффекта создает впечатление обратного рельефа: выпуклости кажутся вогнутыми, выступающие предметы — отступающими, и наоборот. Однако в результате опыта и наличия вторичных факторов стереоскопического видения обратный рельеф при псевдоскопическом рассматривании не воспринимается без борьбы с сознанием, что подавляюще действует на психику наблюдателя. Изображения, получаемые при псевдоскопическом рассматривании, называются *стереоинвертными*.

Наивыгоднейшая величина стереоскопического базиса для получения наиболее естественного рельефа зависит от удаленности рассматриваемых объектов, их глубины и конечных увеличений изображения. Эмпирически установлен целый ряд зависимостей для получения наилучшего эффекта.

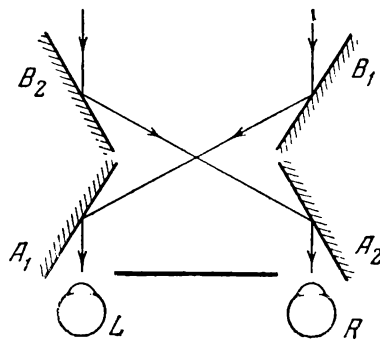


Рис. 27. Псевдоскоп (A_1, A_2, B_1, B_2 — зеркала; L, R — глаза)

Влияние изменения базиса и увеличения стереоскопического прибора на восприятие наблюдаемой картины

Углы в пространстве изображений (V)	Расстояние между точками зрения базис (b)	Приборы, которые выполняют эти условия	Пространство, воспринимаемое в такой прибор, можно представить в виде рассматриваемой невооруженным глазом модели действительного пространства объектов, в которой	
			истинные расстояния E до объекта заменены на	истинные размеры ($1 \times 1 \times 1$) объекта: глубина, ширина, высота — заменены на
Увеличены в m	Не изменено	Обыкновенный бинокль, в котором расстояние между объективами равно расстоянию между окулярами Наблюдение ведется через окуляры	$\frac{1}{m} \cdot E$	$\frac{1}{m} \times 1 \times 1$
Уменьшены в m раз	То же	Как и выше, наблюдение ведется через объективы	$m \cdot E$	$m \times 1 \times 1$
Не изменено	Увеличено в n раз	Зеркальный телестереоскоп (без зрительных труб), стереопланиграф, глаза великана	$\frac{1}{n} \cdot E$	$\frac{1}{n} \times \frac{1}{n} \times \frac{1}{n}$
То же	Уменьшено в n раз	Глаза ребенка, бинокулярная зрительная труба (увеличения 1^+) с уменьшенным расстоянием между объектами (брахистереоскопом)	$n \cdot E$	$n \times n \times n$
Увеличены в m раз	Увеличено в n раз	$n > m$ — стереотруба (2-метрового базиса $m = 10$); $m = n$ — телестереоскоп, стереоскопический дальномер, стереотрубы; $n < m$ — полевой бинокль	$\frac{1}{m} \cdot \frac{1}{n} \cdot E \left(\frac{1}{m} \cdot \frac{1}{n} \right) \times \frac{1}{n} \times \frac{1}{n}$	
То же	Уменьшено в n раз	Бинокулярные микроскопы; стереолупа; бинокулярная зрительная труба с уменьшенным расстоянием между объектами (старый тип театрального бинокля)	$\frac{1}{m} \cdot n \cdot E$	$\frac{1}{m} \cdot n \times n \times n$
Уменьшено в m раз	Увеличено в n раз	Наблюдение ребенка в вышеуказанный театральный бинокль со стороны объектива	$m \cdot \frac{1}{n} \cdot E$	$m \cdot \frac{1}{n} \times \frac{1}{n} \times \frac{1}{n}$
То же	Уменьшено в n раз	Наблюдение великана со стороны объектива в призмный полевой бинокль с раздвинутыми объективами	$m \cdot n \cdot E$	$mn \times n \times n$

Предметы придвинуты к наблюдателю в m раз ближе, с неизменными размерами по фронту, но сокращенными размерами по глубине (кулисное действие) в m раз

Предметы с неизменными размерами по фронту отодвинуты от наблюдателя в m раз дальше, соответственно с этим растянуты по глубине в m раз

Все предметы в n раз уменьшены и приближены к наблюдателю в n раз

Предметы в n раз увеличены и удалены от наблюдателя в n раз

Предметы уменьшены в n раз по фронту, приближены к наблюдателю в mn раз и соответственно этому сокращены по глубине в mn раз (кулисное действие); mn — полная пластика

При $m = n$ — увеличение по фронту в n раз, расстояние и глубина не изменены (кулисное действие)

Для $m = n$ предметы по фронту уменьшены в n раз, расстояния до наблюдателя и глубина неизменны

Предметы увеличены по фронту в n раз, отодвинуты от наблюдателя в mn раз и соответственно с этим растянуты в mn раз по глубине

Более подробно вопрос выбора базиса для воспроизведения неискаженного по форме предметного пространства рассматривается нами в главе IX «Метрика стереоскопического пространства».

Рассматривая пару стереоскопических изображений, не всегда можно добиться слияния ее изображений в одно пространственное. Когда различие между двумя изображениями значительно, так что сопряженные точки изображений попадают на слишком удаленные корреспондирующие точки сетчатки, слитного изображения не получается.

Если один глаз наблюдателя рассматривает две точки C и D , видимые под одним углом, а другой глаз рассматривает две точки A и B , видимые под другим углом, то при значительном превышении угла рассматривания точек C и D по отношению к углу рассматривания точек A и B слияния всех точек не происходит. Также не происходит слияния изображения точек при слишком малом угле между точками C и D . На рис. 28 в средней графе представлена картина слияния двух пар сопряженных точек в зависимости от расположения каждой пары точек в поле зрения (левого A, B)

(1)	A B	A C B D	C D
(2)	A B	A B C D	C D
(3)	A B	A C D B	C D
(4a)	A B	A C B D	C D
(4b)	A B	A D C B	C D
(5)	A B	A D C B	D C
(6)	A B	A B D C	D C
(7)	A B	D A C B	D C

Рис. 28. Различные случаи слияния двух пар сопряженных точек A, B и C, D

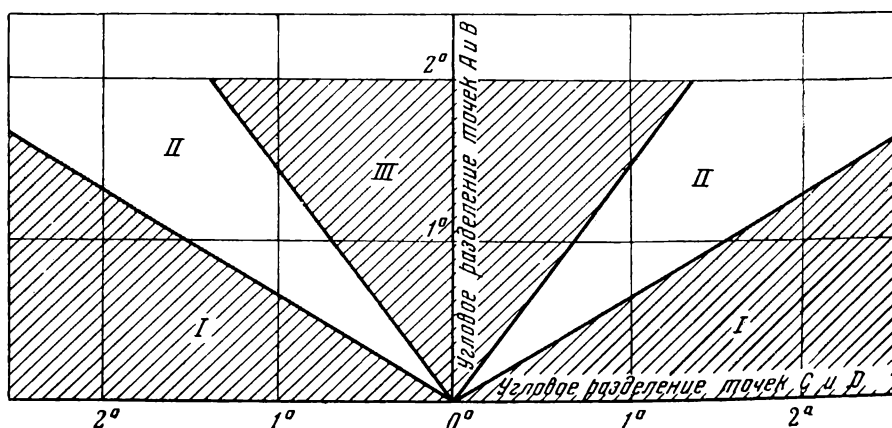


Рис. 29. Зависимость слияния двух пар сопряженных точек A_1B и C_1D от угла рассматривания:

I — зона раздельного видения; II — стереоскопическое видение (зона слияния);
III — раздельное видение

и правого глаза (C, D). Графически эта зависимость показана на рис. 29, где видно, например, что при угле, разделяющем точки A и B , равном 1° , слияние точек C и D с точками A и B происходит только в том случае,

когда угол, разделяющий точки *C* и *D*, не меньше $+0^{\circ},6$ и не превышает $+1^{\circ},6$ (т. е. этот угол лежит в пределах от $-0^{\circ},6$ до $-1^{\circ},6$).

Движения глаз у человека при восприятии стереоскопических изображений, как показывает опыт, аналогичны движениям глаз при восприятии реальных объектов. При переводе взгляда с одного предмета на другой происходит согласованное прослеживание обоими глазами за наиболее сюжетно важными деталями рассматриваемого объекта и также происходят согласованные конвергентные движения глаз.

Следует отметить, что стереоскопический эффект при бинокулярном рассматривании обнаруживает свое действие не сразу. Для получения стереоскопического эффекта при бинокулярном рассматривании пространственных изображений требуется затрата работы сознания обычно порядка до 15 сек. И только по истечении этого времени человек начинает постепенно воспринимать пространственную стереоскопическую картину. Для восприятия более сложного пространственного образа, незнакомого человеку, требуется большее время наблюдения.

В обычных условиях человек может свободно перемещать голову относительно рассматриваемого объекта, тем самым меняя точки зрения правого и левого глаза, благодаря чему он может видеть рассматриваемый объект в разных аспектах. Но пространственное представление о рассматриваемом объекте можно получать и с фиксированных точек зрения.

Правда, ограничение рассматривания объекта всего двумя фиксированными точками зрения правого и левого глаза влечет за собой некоторое ограничение пространственного восприятия, сопровождающееся так называемым явлением кулисности, при котором рассматриваемые объекты представляются как бы вырезанными, плоскими, но различно удаленными от наблюдателя фигурами.

Преодолеть явление кулисности при рассматривании стереоскопических изображений можно только за счет некоторого (хотя бы небольшого) плавного или скачкообразного перемещения точек зрения при рассматривании пространственной картины.

Способы создания пространственного восприятия воспроизводимой картины, использующие для этого средства сепарированного, т. е. раздельного наблюдения каждым глазом зрителя фиксированных двух изображений, носят название стереоскопических способов воспроизведения изображений. В том случае, когда наблюдателю дается возможность некоторого выбора правого и левого сопряженного изображения из нескольких воспроизводимых одновременно сопряженных пар изображения за счет отклонений головы от нормального положения в ту или другую сторону, достигается так называемое панорамное воспроизведение пространственной картины, при котором преодолевается кулисность.

В узком понимании под стереоскопическим воспроизведением изображений всегда подразумевается бинокулярное стереоскопическое воспроизведение, при котором обеспечивается восприятие каждым глазом зрителя своего соответственно правого или левого сопряженных изображений бинокулярный стереоскопический эффект. В создании пространственного образа при бинокулярном видении участвуют конвергенция глаз и обусловленное ею окуломоторное действие, а также параллактическая разность сопряженных изображений, получаемых на корреспондирующих точках сетчатки правого и левого глаза вследствие рассматривания объектов с двух различных точек зрения, т. е. вследствие смещения центра перспективы одного изображения относительно другого. Главным фактором бинокулярного стереоскопического видения надо считать последнее, т. е. получение сопряженных, но не идентичных изображений на корреспондирующих точках каждого глаза.

Под сопряженными изображениями понимают такие изображения, которые получены центральной проекцией одного и того же объекта, но с различных точек зрения. Пара сопряженных изображений, получаемых с точки зрения правого и с точки зрения левого глаза, называется нормальной стереограммой, а иногда просто стереопарой.

§ 6. ОСОБЕННОСТИ БИНОКУЛЯРНОГО ВОСПРИЯТИЯ ЦВЕТА

Бинокулярное видение сопровождается не только стереоскопическим эффектом, позволяющим определять глубину и объемность пространства, но также и эффектом, позволяющим определять фактуру поверхностей рассматриваемых предметов. Последнее особенно сильно проявляется при рассматривании цветных и блестящих предметов, блеск поверхностей которых воспринимается неодинаково правым и левым глазом. На листе VII приведены пары сопряженных изображений, при стереоскопическом рассматривании которых можно наблюдать характерный блеск металлических и стеклянных поверхностей.

Стереоскопические изображения позволяют также воспроизводить цветной блеск кристаллов, что невозможно передать при помощи обычного плоского рисунка.

Обычное восприятие цветных оттенков правым и левым глазом у каждого человека несколько отличается друг от друга. Этого мы в жизни не замечаем, но встречаются условия, при которых одному и другому глазу приходится видеть большую разницу в цвете предмета. Это происходит, когда к каждому глазу попадают от предмета разно окрашенные лучи. В этом случае происходит бинокулярное смещение двух различных цветных оттенков, воспринимаемых правым и левым глазом. Такое смещение цветов создает видимость нового цветного оттенка рассматриваемого предмета.

Бинокулярное смещение цветов не совсем подобно смещению цветов, происходящему при монокулярном наблюдении. Так, например, если один глаз видит белое поле, а другой смотрит на черную поверхность, то у нас возникает ощущение свособразного серого глянца, сменяющегося иногда впечатлениями то черного, то белого поля. Эти изменения называются «борьбой полей зрения». Именно вследствие этой борьбы полей зрения мы и воспринимаем металлический блеск предметов, характерный блеск кристаллов и цветную игру драгоценных камней. Во всех этих случаях каждый глаз наблюдателя видит различно окрашенными соответствующие участки рассматриваемого предмета.

Стереограмма кристалла, изображения которого для правого глаза окрашены в черный цвет, а для левого — в белый цвет, при стереоскопическом наблюдении создает пространственную картину кристалла с блестящими поверхностями. Точно так же, если бы грани этого кристалла были окрашены в другие цвета, мы видели бы игру цветных оттенков этого кристалла.

Создавая искусственную возможность наблюдения правым и левым глазом различных цветных оттенков одной и той же поверхности, мы можем искусственно вызвать иллюзию металлического блеска даже от матовых поверхностей. В качестве такого примера мы можем привести опыт, предложенный Р. Полем. Если взять лист бумаги, окрашенный в оранжевый цвет, и на небольшом расстоянии от него расположить черную сетку, а затем эту сетку осветить ярким точечным источником света, то от сетки образуются на листе бумаги теневые полосы. Рассматривая несколько сбоку поверхность освещенного листа через сетку, мы убедимся в том, что правому и левому глазу не все участки рассматриваемого листа будут представляться одинаково ярко освещенными, так как от

одного глаза некоторые участки листа будут прикрыты черной сеткой, а для другого глаза они окажутся ярко освещенными. Вследствие такого несоответствия видимых яркостей этих участков бинокулярное рассматривание создает впечатление металлического блеска от этого листа, похожего на блеск медной полированной пластинки.

Бинокулярное смешение ярко окрашенных разных цветных лучей создает ту игру и блеск камней, которые не могут быть воспроизведены художником на картине, так как он не имеет возможности создать различную цветность окраски для правого и левого глаза зрителя.

В естественных условиях при преломлении света на гранях кристаллов драгоценных камней вследствие дисперсии вещества происходит разложение белого света в спектр.

Получаемые таким образом спектральные лучи оказываются в различной мере отклоненными, в результате чего к одному и другому глазу наблюдателя приходят от одной и той же грани кристалла лучи различных цветов.

Нужно заметить, что при бинокулярном смешении двух различных цветов, видимых правым и левым глазом, в результате борьбы полей зрения возникают периодически сменяемые впечатления ощущений то одного, то другого оттенка цвета. Однако цвет поверхности наблюдаемого предмета в данном случае зрителю представляется имеющим некоторый средний оттенок между теми цветами, которые видны отдельно правым и левым глазом. Этот воспринимаемый цвет поверхности предмета оказывается таким же, как это было бы при монокулярном смешении тех цветных оттенков, которые видны правым и левым глазом. Это обстоятельство подтверждает то, что воспринимаемое нами бинокулярное смешение цветов зависит от центральной нервной системы.

Особенности бинокулярного смешения цветов позволяют зрительно отличать цвет предмета от цвета освещения и узнавать истинную окраску предмета независимо от цветовых оттенков освещения.

§ 7. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ ПЛАСТИЧНОСТЬ ЗРИТЕЛЬНОГО ОБРАЗА

Стереоскопический эффект, обусловленный бинокулярным зрением, в своем проявлении ограничен не только порогом глубины и радиусом стереоскопического видения, но и невозможностью различения удаленности предметов, имеющих протяженность, параллельную базису между зрачками. Так, ряд разноудаленных параллельных линий, имеющих горизонтальное направление, не может быть стереоскопически различим при вертикальном положении головы наблюдателя.

Поскольку рельеф предметов при бинокулярном рассматривании может быть различим только в результате параллактической разности очертания контуров изображений, получаемых на сетчатке правого и левого глаза, крайне необходимо, чтобы очертания этих контуров были возможно более резкими и вертикальные контуры были наиболее тонко выделены. В этом отношении очень большое значение для восприятия рельефа имеет характер освещения рассматриваемых предметов. «Плоское», равномерно высвечивающее предмет освещение, создающее мягкие полутени, крайне ослабляет впечатление рельефа предмета. Точно так же освещение, создающее лишь горизонтальные, резко очерченные тени, при бинокулярном рассматривании не помогает выявлению рельефа предмета. При слабом сумеречном свете стереоскопическая картина утрачивает свою объемность.

Отсюда можно сделать заключение, что бинокулярное зрение далеко не в полной мере может обеспечить зрительное восприятие глубины пространства. В действительности человек значительно лучше определяет и

оценивает протяженность реального пространства, чем это обеспечивает эффект бинокулярного зрения.

Мощным подспорьем для пространственной ориентации служат вторичные факторы стереоскопического видения. К ним причисляются психофизиологические факторы, использующие для обоснования суждения о глубине и рельефе рассматриваемых предметов работу ассоциации и опыта, накопленных человеком. К этим факторам, как мы уже заметили, относятся видимая величина предметов, линейная перспектива, воздушная перспектива, заполненность промежуточного пространства между предметами, загоразживание одних предметов другими, распределение светотеней на поверхности предметов, различный характер кажущегося перемещения предметов при движении головы, цветной контраст, яркость освещения и др.

Вторичные факторы стереоскопического видения могут давать зрительное представление об удаленности наблюдаемых предметов при рассматривании их одним глазом, т. е. без участия бинокулярного стереовидения. Поэтому все вторичные факторы, обуславливающие усиление пластичности зрительного образа без участия бинокулярного зрения, иногда объединяют общим названием — монокулярный стереоэффект.

При некотором удалении объектов, сравнительно небольшом — порядка 5—6 м, человек обычно не замечает различия в пространственном впечатлении от предмета при рассматривании его двумя или одним глазом. При рассматривании же одним глазом близких предметов до 1—2 м получаемый пространственный эффект проявляется значительно слабее, чем при рассматривании двумя глазами.

Монокулярный стереоскопический эффект возникает из-за проявления особенностей перспективы. Наблюдение различных, взятых из практического опыта эффектов облегчает для нас восприятие объемного расположения объектов. По углу зрения, под которым видны известные нам предметы, можно заключить об их удаленности.

Восприятие глубины благоприятствует распределению теней объектов. При наблюдении предметов, находящихся на больших расстояниях, мы считаемся и с воздушной перспективой, уменьшающей контрастность и яркость цветов удаленных объектов вследствие воздушной дымки и замутнения изображения туманом и пылью атмосферы.

В меньшей мере для суждения об удаленности предметов человек использует аккомодацию глаза; известную роль играет она лишь при определении относительных расстояний между предметами. Особенно ощутимо восприятие глубины в случае монокулярного рассматривания при горизонтальном или отвесном передвижении головы. При этом на сетчатку друг за другом падают изображения из различных центров перспективы.

Зачастую мы усиливаем и бинокулярное восприятие глубины посредством подобных дополнительных движений головы в том случае, если бинокулярных параллаксов для суждения о расположении объектов по глубине недостаточно. Если мы качнем головой, скажем, немного направо, тогда предмет, расположенный далеко, также отходит вправо относительно более близкого, а более близкий — влево.

По степени такого относительного взаимного сдвига мы можем очень хорошо устанавливать расположение предметов по глубине. Именно благодаря этому пространственное расположение предметов различается лучше при монокулярном рассматривании натуры, чем при рассматривании рисунка, имеющего такую же перспективу. При рассматривании рисунка или плоского изображения мы не можем посредством бинокулярного зрения или движения головы подкреплять суждение о пространственности данного изображения. Наоборот, мы связаны с определенным расположением точки зрения в пространстве в течение всего времени наблюдения. Если, несмотря на это, мы можем правильно истолковывать (в отношении

передаваемой глубины) перспективно нарисованные изображения, то этим мы обязаны работе нашего сознания, дающего ощущение пространства, подобно тому как мы можем в перспективном изображении кубика всегда воспринимать нарисованные острые и тупые грани в виде прямых углов.

При описанных выше отношениях для суждения о глубине посредством движения наблюдателя принципиально однозначно, движется ли наблюдатель мимо покоящегося ландшафта, или же ландшафт проходит мимо покоящегося на месте наблюдателя. В идущем поезде мы всегда получаем впечатление относительного покоя по сравнению с проходящими снаружи видами, однако эти виды отличаются особенной пространственностью. В кинематографическом фильме почти всегда происходят относительные изменения положений между подвижными объектами (в большинстве — людьми и различными предметами, ранее знакомыми нам по своей величине и форме). Это также создает на экране особую подчеркнутую рельефность кинематографического изображения. Кинематографический игровой фильм обладает поэтому сам по себе известной «пластикой». Знание встречающихся по ходу действия объектов и наше данное заранее ощущение объема приводят к тому, что пластическое впечатление остается и для тех мест наблюдения, которые существенно отличаются от перспективно правильных.

Средства усиления пластичности обычных плоских изображений могут быть разделены на: 1) средства, основанные на монокулярном стереоэффекте, обуславливающие создание пластики перспективы; 2) средства, основанные на глубинном стереоэффекте, вызываемом аккомодационными усилиями глаз; 3) средства, основанные на эффекте рельефа, создаваемом светотенями; 4) средства, основанные на последовательно-временном динамическом стереоэффекте, создающие пластику движения и 5) средства, основанные на псевдобинокулярном стереоэффекте, имеющие целью создание ложной пространственной иллюзии при рассматривании плоских изображений.

Все эти средства усиления рельефности и пластичности изображения не только придают пластичность плоскому изображению, но и используются для усиления рельефа и пластичности стереоскопических картин. В том случае, если при осуществлении стереоскопического воспроизведения эти средства не используются, стереоскопический эффект, даваемый изображением, оказывается неполным и благодаря этому некоторые стереоскопические изображения иногда дают очень слабое представление о пространственной глубине.

Пластика перспективы. Первое представление об удаленности того или другого предмета у человека обычно складывается на основе психологического опыта. Если на рисунке перспектива явно не выражена, то все же по загромождению одних предметов другими сразу видно, какой из них находится дальше от наблюдателя, а какой ближе к нему. Так, например, глядя на рис. 30, сразу можно сказать, какие из кружков расположены ближе, какие дальше. То же можно сказать и в отношении значения загромождаемости предметов для относительного представления об их удаленности. Загромождающий предмет служит пространственным ориентиром для загороженного им предмета, и наоборот.

Масштабные ориентиры, позволяющие оценивать действительную величину предметов по сравнению с известными размерами «масштабных» предметов, одновременно являются также пространственными ориентирами. Проиллюстрируем это на примере. На рис. 31 изображены два дома, форма, размер и перспективные искажения которых совершенно одинаковы; они различаются только размером окон и количеством их. Окна, образующие ярусы этажей, в данном случае являются масштабным ориентиром. По количеству этажей можно с уверенностью сказать, какой дом выше, но так как видимая угловая величина изображений того и другого

дома одинакова, то многоэтажный дом будет казаться удаленным на большее расстояние.

Одинаковой величины предметы по мере их удаления от наблюдателя видны под меньшим углом зрения. Так, уходящий вдаль ряд столбов или колонн одинаковых размеров кажется постепенно уменьшающимся в угловых размерах (рис. 32). Горизонтальные параллельные линии, по законам перспективы, сходятся на горизонте в одной точке. В зависимости от

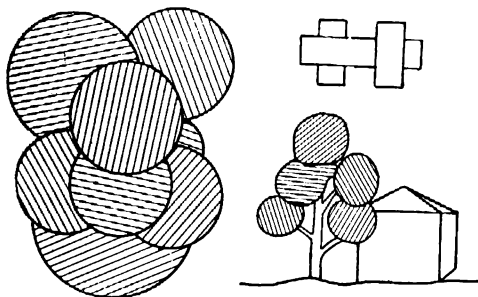


Рис. 30. Кажущееся загромождение передними предметами дальних

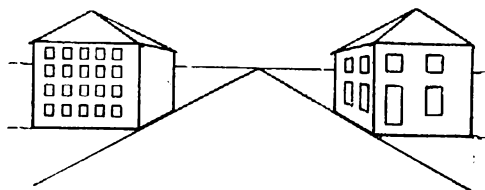


Рис. 31. Значение пространственных ориентиров

поворота плоскости рассматриваемой фигуры изменяются ее угловые размеры (рис. 32, б). Перспективные изменения видимой формы предметов подчинены законам л и н е й н о й п е р с п е к т и в ы. Слово «перспектива» происходит от латинского глагола *perspicere* — «видеть насквозь» и означает изображение предмета, полученное посредством центральной проекции. Если от точки зрения глаза провести лучи ко всем точкам

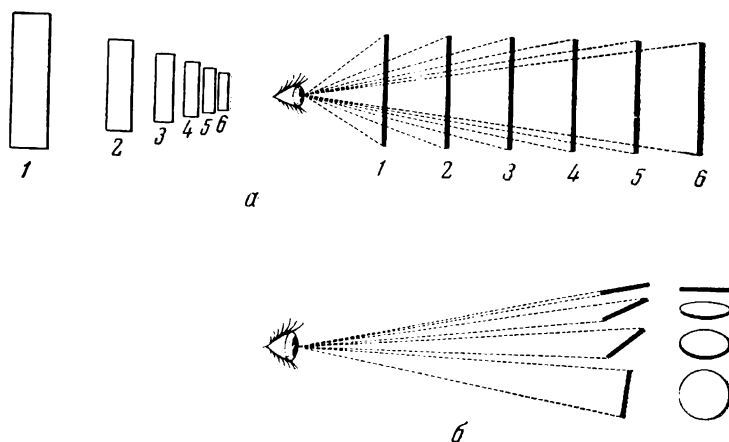


Рис. 32. Перспективные изменения видимых размеров предмета

рассматриваемого предмета, мы будем иметь *ц е н т р а л ь н у ю п р о е к ц и ю* с центром проекции в точке зрения. Пересекая эти лучи какой-либо плоскостью *K* (рис. 33), мы получим на плоскости образованное следами лучей перспективное изображение *abdefghi* предмета *ABDEFGHI*. По полученному перспективному изображению предмета можно до некоторой степени восстановить форму и объем самого предмета. Но определить

форму и объем предмета можно только в том случае, если известна либо удаленность предмета, либо его действительная величина.

Перспективное изображение предмета, полученное посредством центральной проекции, иначе называемое линейной перспективой предмета, может быть получено на плоскости K следами лучей, соединяющих центр проекции C с точками предмета, но может быть получено также и следами пересечения с плоскостью K продолжения этих лучей за центр проекции C или за предмет M . Фотографический объектив, как и глаз, рисует изображения предметов по законам линейной перспективы. Во всех этих случаях чем дальше удален предмет от центра проекции по сравнению с расстоянием плоскости изображения от центра проекции, тем меньше размер получаемого перспективного изображения. Размер изображения h во столько раз меньше размера предмета H , во сколько раз расстояние L от центра проекции до предмета больше расстояния f от центра проекции до изображения, т. е.

$$h : H \approx f : L; \quad h = \frac{fH}{L}.$$

Размер предмета, удаленного на очень большое расстояние от центра проекции, по сравнению с расстоянием от центра до плоскости изображений становится бесконечно малым, его изображение превращается в точку, так как если $L = \infty$, то

$$h = \frac{fH}{L} = 0.$$

Поэтому же прямая линия, удаляющаяся от плоскости изображения в бесконечность, дает перспективное изображение конечной прямой. Один конец этой прямой A (рис. 34) на плоскости изображения определяется пересечением линии с этой плоскостью, другой конец изображения линии определяется следом на плоскости луча, идущего из центра перспективы C параллельно данной линии AB . Для всех линий, параллельных данной линии AB , перспективное изображение будет иметь одну общую

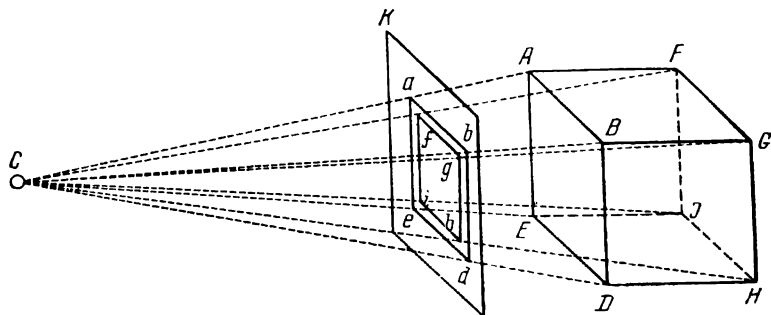


Рис. 33. Центральная проекция куба

конечную точку F , называемую точкой схода. Поэтому перспективное изображение параллельных линий всегда получается в виде сходящегося пучка прямых. Точки схода не имеют только фронтальные линии (параллельные плоскости изображения).

Относительные размеры изображений предметов, различно удаленных от центра перспективы, не зависят от положения плоскости изображения, если центр перспективы остается на месте, а плоскость изображений передвигается параллельно самой себе; однако конечные размеры изображений при этом изменяются. При удалении плоскости изображений от центра перспективы в два раза и линейные размеры изображения предметов увеличатся в два раза. Линейные размеры изображения изменяются прямо пропорционально удалению плоскости изображения от центра

проекции. При перемене положения центра проекции изменяются размеры изображений предметов, различно удаленных от центра. Поэтому при фотографировании предметов с неподвижной точки зрения объективами разных фокусных расстояний изображения получаются подобными друг другу, величины же изображений предметов будут пропорциональны фокусным расстояниям объективов. При перемене точки зрения, т.е. при приближении или удалении съемочного аппарата к фотографируемым предметам, изменяются на разные величины размеры изображений разноудаленных планов.

На рис. 35 изображены фотографии, снятые с одной и той же точки зрения, но объективами разных фокусных расстояний. Изображения подобны друг другу, однако при рассматривании мы замечаем различную их глубину. На фотографии, снятой длиннофокусным объективом, величина изображения объектов больше и сами объекты кажутся расположенными ближе, чем на фотографии, снятой более короткофокусным объективом. Каждая из этих фотографий может дать правильное представление об удаленности объектов, если ее рассматривать с такого же расстояния, каково было фокусное расстояние объектива, примененного для съемки данной фотографии.

Изображение, полученное на плоскости центральной проекцией, должно рассматриваться из своего центра проекции для того, чтобы быть восстановленным в натуральной пропорции. Если это изображение будет рассматриваться с более близкого расстояния, угловые величины изображения будут больше; следовательно, предмет либо будет казаться увеличенным, либо (если представление об его величине известно из опыта) приближенным во столько же раз, во сколько расстояние рассматривания меньше удаленности центра проекции. При рассматривании изображения с расстояния, лежащего за центром проекции, предметы будут казаться либо более удаленными, либо уменьшенными. Так как кажущееся приближение или удаление предметов зависит от увеличения или уменьшения видимого угла изображения, то очевидно, что прямое увеличение или уменьшение изображений на плоскости создает такое же впечатление кажущегося приближения или удаления предметов, как соответственные изменения их размеров.

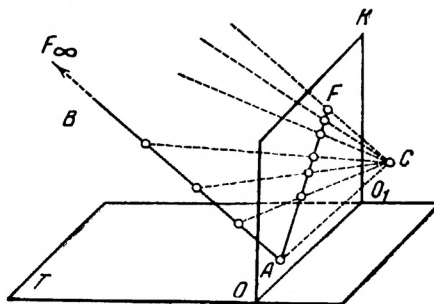


Рис. 34. Точка схода (F) на картинной плоскости (K)



Рис. 35. Фотографии, снятые с одной точки зрения, но объективами разных фокусных расстояний: $f = 36$ мм (верхний рис.), $f = 70$ мм (нижний рис.).

Несовпадение точки зрения с центром проекции при рассматривании изображения вызывает кажущееся приближение или удаление различно удаленных предметов на неодинаковое расстояние. Все предметы кажутся приближенными или удаленными в определенное число раз, а не на постоянную величину. Поэтому, если рассматривается изображение с расстояния, вдвое меньшего расстояния до центра проекции его, все предметы будут казаться вдвое приближенными по отношению к центру проекции. Предмет, удаленный на 20 м, будет казаться на расстоянии 10 м, а предмет, удаленный на 5 м, будет казаться на расстоянии 2,5 м. Очевидно, действительное расстояние между предметами ($20\text{ м} - 5\text{ м} = 15\text{ м}$) будет теперь казаться равным всего лишь $10\text{ м} - 2,5\text{ м} = 7,5\text{ м}$. Следовательно, при рассматривании изображений не из центра перспективы изменяются не только кажущиеся размеры и удаленность предметов, но изменяется и кажущаяся глубина самого предметного пространства. Увеличенные изображения дают кажущееся приближение предметов и уменьшают кажущееся расстояние между предметами. Уменьшенные изображения (изображения, сфотографированные короткофокусными объективами, рассматриваемые с расстояния большего, чем удаленность центра проекции) дают кажущееся удаление предметов и растягивают кажущееся расстояние между ними по глубине. Рассматривание перспективных изображений, с точки зрения соответствующей центру проекции, придает картине впечатление пространственной глубины и рельефа. Этот эффект иногда называют **пластикой перспективы**.

При рассматривании обычных фотографических изображений или рисунков, выполненных с соблюдением законов перспективы, можно получить пространственное суждение об изображенной картине. По плоскому рисунку можно определить, какие из изображенных предметов находятся ближе, какие дальше. По этому же рисунку можно определить объемность самих изображенных предметов, определить их рельеф и т. д. Общеизвестно, что если рассматривать картину или фотографический снимок из центра перспективы данного изображения (особенно, если рассматривать это изображение одним глазом через узенькую трубочку, ограничивающую поле зрения только данной картиной), то достигается очень эффектное впечатление рельефности и глубины воспроизводимого на картине пространства. Чтобы убедиться в этом эффекте достаточно посмотреть, например, на картину, приведенную на рис. 36, одним глазом через согнутую в трубочку ладонь или через короткую трубочку из бумаги. Помещая глаз на расстояние от рассматриваемого фотографического изображения, равное фокусному расстоянию употреблявшегося при съемке объектива, умноженному на кратность увеличения фотоснимка, и рассматривая изображение с той же точки зрения по отношению к изображению, в которой находился объектив при фотографировании изображения, можно получать достаточно сильное ощущение пространственности и рельефа картины.

Правда, здесь следует еще раз заметить, что точка зрения и перспективное изображение предмета недостаточны для полного определения удаленности, величины и формы предмета. Но жизненный опыт человека при рассматривании изображений знакомых предметов, дополняя, подсказывает недостающие элементы для определения пространственности.

Впечатление рельефа, создаваемое светотенями, контрастом и цветом. Отдаленность одного предмета от другого мы замечаем вследствие видимости контуров отдельных предметов, вследствие видимого различия цветов, яркости и освещенности поверхностей различных предметов. Различимость контуров и неровностей одноцветной поверхности становится возможной только вследствие неодинаковой яркости такой поверхности и контуров, а также различия яркости или цвета находящегося за ним фона. Если осветить шероховатую или изогнутую поверхность рассеян-



ным светом совершенно равномерно, чтобы не было заметно на ней следов тени, то такая поверхность будет представляться ровной плоскостью. При освещении этой поверхности точечным источником света или пучком косо падающих на нее лучей обнаруживается рельеф поверхности в результате образовавшихся при этом освещении теней.

Резкие контрастные тени, ограниченные четкими линиями, дают представление о контурах и границах поверхностей предмета. Тени с размытыми краями, с постепенно изменяющейся светлотой дают представление с плавно изменяющимся рельефе поверхности. Плавно изменяющаяся светлота тени с нерезко очерченными границами дает представление о шаровой поверхности. Равномерная светлота отдельных участков изображения вызывает представление об их плоском характере, причем резкие границы светлот дают представление о границах различных поверхностей предмета и его контурах.

Характер образования теней, форма видимых теней зависят от формы предмета, их изображения подчинены также законам перспективы. На рис. 37 показано построение перспективного изображения тени от параллелепипеда при центральном освещении (точечный источник света). Грани параллелепипеда $ABba$, $BEeb$, $EGge$ оказываются в собственной тени, и, кроме того, будет видна падающая от предмета тень $aA_0B_0E_0geb$.

Характер тени зависит от направления падающих на предмет лучей, от положения источника света. Человек в жизни обычно встречается с источниками света, расположенными выше линии горизонта. Поэтому при освещении предмета снизу рельеф кажется неестественным (рис. 38). Представление о рельефе незнакомого предмета (которое складывается только в результате впечатления, создаваемого распределением светотеней на поверхности предмета) при изменении направления освещающих предмет лучей может оказаться совершенно неправильным. При освещении предмета с точки, лежащей ниже точки ее рассматривания, рельеф получается обратным. Так, холм представляется кратером (воронкой); если

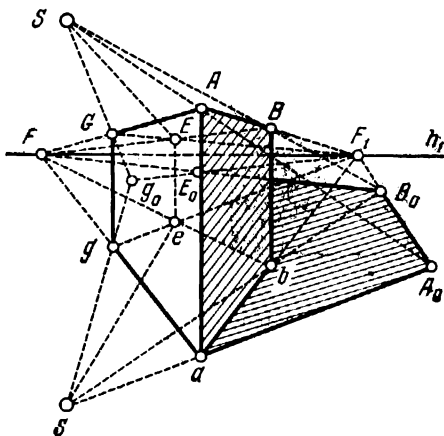


Рис. 37. Перспективное изображение тени ($aA_0B_0E_0geb$) при точечном источнике света (S)

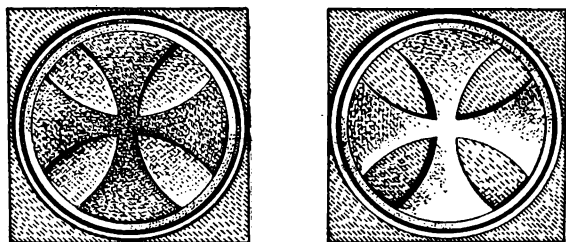


Рис. 38. Неестественное падение освещения

предмета дает направление освещающих лучей под углом около 90° к направлению рассматривания. Для плоских поверхностей, ограниченных прямыми линиями, благоприятное освещение создается при наклоне падающих лучей не более 10° по отношению к освещенной поверхности.

повернуть рисунок «вверх ногами», выпуклость шара становится вогнутостью (интаглио).

Мягкое освещение рассеянным светом дает нерезкие тени; поэтому контуры поверхностей предмета становятся менее четкими, округлыми, впечатление рельефа изображения снижается. Наиболее яркое представление о рельефе шероховатой поверхности

Однако надо заметить, что каких-либо правил для благоприятного освещения пространственных предметов не существует.

Чем больше градация яркостей, тем большая подробность рельефа может быть обнаружена. Различия контраста деталей значительно влияют на воспроизведение рельефа изображения. Так же как различию светотеневых переходов, созданию пространственного представления о предмете и его рельефе помогает наличие градаций цветных оттенков и цветной контраст.



Рис. 39. «Фигура» и «фон»

В обычных условиях все естественные предметы отличаются друг от друга, помимо своей формы, величины, освещенности и т. п., еще и цветностью. Различие цветности предметов помогает подсознанию отделять, различать один предмет от другого; поэтому цветные изображения предметов отличаются большой пространственностью и большим рельефом. Для создания пространственного впечатления большую роль играет цветность светотеней.

В обычных условиях свет и тень имеют свой цветной оттенок, и это вносит определенный колорит в картину. Солнечный свет имеет некоторый субъективно воспринимаемый желтоватый оттенок, а тени в безоблачный день от неба окрашены в голубоватый цвет. При воспроизведении картины с окрашенными светотенями обнаруживается большая реальность изображения, сохраняющая естественный колорит картины; тем самым создается известный естественный эффект рельефности изображения.

Рассматривая влияние цветного и черно-белого контраста на пространственное восприятие изображений, можно отметить интересное явление, связанное с контрастом цветного и черно-белого фона. Так, например, при рассматривании оранжевой марки на зеленом фоне она кажется плавающей над этим фоном.

Психологическое представление о предмете и фоне выделяет предмет от фона, приближая его к наблюдателю. Это наглядно иллюстрируется примером «фигуры» и «фона», приводимым на рис. 39. Что воспринимается как «фигура» и что как «фон», зависит от целого ряда факторов. На приведенном рисунке мы можем видеть либо белую вазу на черном фоне, либо два черных профиля, обращенных друг к другу, на белом фоне. Обычно как «фон» воспринимается большее поле, а меньшее поле воспринимается как «фигура»; однако в большинстве случаев «фон» различается в силу законов воздушной перспективы, снижающих насыщенность его цветного тона, уменьшающих степень различимости его деталей и контуров.

Воздушная перспектива и аккомодационная глубина резкости. При рассматривании пространственной картины, имеющей достаточную глубину, для восприятия объемности существенное значение имеет воздушная перспектива, которая вызывает значительный эффект пластики.

Воздушная перспектива выражается в том, что далекие предметы по мере удаления от точки наблюдения становятся менее контрастными (рис. 40), менее яркими, прикрытыми воздушной голубоватой дымкой, создаваемой рассеивающим действием толщины воздушного слоя, отделяющей их от наблюдателя. Так, например, наблюдая удаленные горы, мы видим их покрытыми бледной синеватой дымкой. В ясные дни,

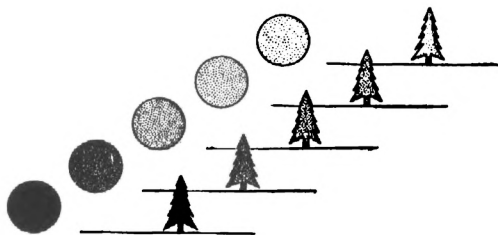


Рис. 40. Принцип образования воздушной перспективы

когда воздух особенно чист, синеватая дымка, прикрывающая удаленные горы, становится прозрачнее, очертания гор становятся резче, и при этом создается впечатление, что горы находятся значительно ближе к наблюдателю, чем раньше.

Удаленность предмета от наблюдателя сопровождается уменьшением различимости предметов; ввиду ограниченности остроты зрения мелкие детали предметов исчезают, становятся неразличимыми. Предметы же, находящиеся на переднем плане, видны более резкими, с более насыщенной цветной окраской; тонкий слой воздуха, отделяющей их от наблюдателя, сохраняет полную ясность и различимость мелких деталей во всех подробностях. Различимость деталей на удаленных предметах снижается не только за счет несовершенства глаза, но и за счет воздушной вуали толстого слоя воздуха, отделяющего эти предметы от наблюдателя. Некоторое сходство по стереоскопическому действию с воздушной перспективой имеет явление аккомодации глаза. Это сходство состоит в том, что как воздушная перспектива позволяет определять удаленность объектов в зависимости от резкости очертания их контуров, так и аккомодация глаза ограничивает резкость наблюдаемых объектов в зависимости от удаленности объектов.

Глаз человека при одновременном рассматривании нескольких разнотеленных предметов отчетливо может видеть только тот предмет, на который глаз аккомодирован в данный момент. Остальные предметы, находящиеся в поле зрения, будут видны более или менее нерезко. Однако если рассматриваемые предметы удалены друг от друга на небольшое расстояние или если лежат за пределами аккомодации (т. е. на расстоянии, большем 40 м), то все они будут одновременно видны отчетливо.

Эффект аккомодационного усилия при переводе взора от одного удаленного предмета на другой, более далекий или более близкий, сопровождается потерей резкости изображения предметов. Этот эффект является одним из вторичных факторов стереоскопического видения, называемых иногда псевдоглубинным стереоэффектом. Псевдоглубинный (аккомодационный) стереоэффект обнаруживается только в пределах аккомодации, т. е. для предметов, удаленных на расстояние не свыше 40 м, а практически он уже мало заметен на расстоянии свыше 6 м.

§ 8. ПЛАСТИКА ДВИЖЕНИЯ И ДИНАМИЧЕСКИЙ СТЕРЕОЭФФЕКТ

Особенно большой эффект для объемного восприятия пространства создают перемещения и поворачивание рассматриваемых предметов относительно наблюдателя или перемещения последнего относительно рассматриваемых предметов.

Относительные перемещения предмета приводят к образованию параллактической разности последовательно получаемых изображений предмета на сетчатке глаза. Эта параллактическая разность получается в каждом глазу наблюдателя. Конфигурации изображения на сетчатке изменяются последовательно во времени. Получаемое за промежуток времени, соответствующий зрительной инерции глаза, смещение какой-либо точки изображения рассматриваемого предмета на сетчатке относительно перемещающейся, фиксируемой точки изображения называется **временным параллаксом**.

Временной параллакс по своей природе сходен с объемным параллаксом, обуславливающим нормальный стереоэффект. Параллактическое смещение изображения на сетчатке одного глаза при относительно небольших скоростях движения предмета ведет к образованию пространственного образа предмета, а при значительных скоростях движения вызывает «смазывание» контуров и формы предметов. Образование пластического эффекта при последовательном рассматривании изображений предмета,

полученных с различных точек зрения, основывается на законах перспективы движения, когда центр перспективы движется по какой-либо траектории.

Можно искусственно создавать пластический эффект при рассмотрении последовательно чередующихся изображений, нарисованных по правилам перспективы движения. Серии таких рисунков с изображениями пирамид, цилиндров, усеченных конусов, образующих попарно стереограммы, показаны на рис. 41. Каждый горизонтальный ряд на рис. 41 представляет собой серию изображений, при последовательной проекции которых на экран можно получить совершенно явственный стереоскопический эффект.

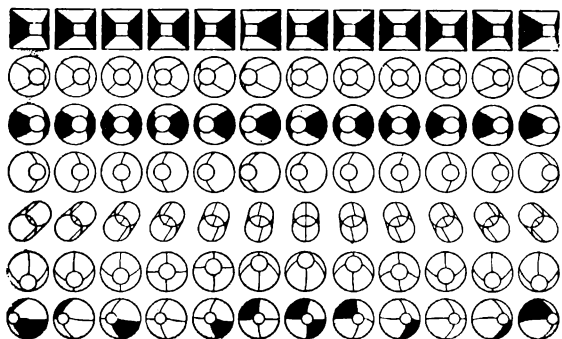


Рис. 41. Серии пластических изображений, иллюстрирующие воспроизведение динамического стереоэффекта; изображения построены по законам центральной проекции с перемещаемого центра перспективы

Такой же эффект получается и при стробоскопическом рассмотрении этих изображений одним глазом, при этом получается впечатление, будто бы неподвижный квадрат нижнего основания пирамиды образует задний план, перед которым проходит малая торцовая поверхность.

При просмотре фильмов, снятых движущимся аппаратом (т. е. с движущейся точки зрения), кажущаяся рельефность и объемность изображения невольно поражает зрителя. Такое впечатление оставляют кинокартины, снятые с движущегося поезда; поэтому и сам эффект пла-

стичности, вызываемый съемкой с движения, иногда называют «железнодорожным эффектом». Такой же эффект дают картины, снятые с палубы парохода, с борта лодки, из автомобиля и т. п.

Пластический эффект при съемке с движения подчас мало в чем уступает действительному бинокулярному стереоскопическому эффекту. И это вполне понятно. Природа пластического эффекта съемок с движения сходна с природой бинокулярного стереоскопического эффекта, так как оба они обязаны своим появлением параллактическим смещением соответственных точек изображения, параллактической разности воспринимаемых изображений, и вызваны первая — временным, вторая — объемным параллаксом.

В то время как параллактическая разность изображений при бинокулярном эффекте ограничена нормальным базисом точек зрения, при съемке с движения параллактическая разность изображений может последовательно нарастать до значительно больших величин, так как базис между точками зрения следующих друг за другом изображений может неограниченно увеличиваться, что обуславливает даже превосходство пластики движения по сравнению с пластикой бинокулярного эффекта.

Причины возникновения пластического эффекта при съемках с движения лежат в основе динамического стереоэффекта. Динамический стереоэффект, так же как бинокулярный, позволяет оглядывать предмет с большим углом охвата, видеть боковые стороны предмета, которые загорожены при прямом видении с неподвижной точки зрения, видеть фон и предметы, находящиеся за крайями контура впереди расположенного предмета, осуществлять сравнительную оценку загораживания контурами ближних предметов, удаленных предметов и фона, не перекрываемых при прямом

видении с неподвижной точки зрения. Все эти явления, сопровождающие съемку с движения, суммируются в подсознании зрителя и создают пластический стереоэффект. При этом динамический стереоэффект, обеспечивая непрерывную последовательность ряда точек зрения на рассматриваемую картину, преодолевает ощущение кулискости, неотступно сопутствующее двум фиксированным точкам зрения обычного стереоскопа.

При относительном перемещении объекта вдоль оптической оси глаза (т. е. при относительном приближении и удалении объекта) также наблюдается пластический эффект, обусловленный последовательным изменением глубинного параллакса, так называемым глубинным стереоэффектом, который заметно сказывается лишь при не очень большом удалении рассматриваемых объектов.

§ 9. ОШИБКИ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ И НЕКОТОРЫЕ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЕ ИЛЛЮЗИИ

Наше зрение представляет особый, довольно сложный психофизиологический процесс. Поэтому те физические явления, вследствие которых получается изображение на сетчатках наших глаз, и те геометрические построения, которые можно сделать на основе хода лучей через преломляющие элементы зрительного аппарата, не всегда дают образы, которые должны были бы объективно воспроизводиться, на основе законов оптики. Вследствие психофизиологических особенностей восприятия зрительного образа субъективность суждения при рассмотрении действительного объекта часто дает образ, малосходный с изображением рассматриваемого предмета, получаемым на сетчатке наших глаз.

Однако зрительный аппарат, обладает высокой степенью приспособляемости. Благодаря этому свойству мы, сопоставляя зрительные ощущения с теми, которые дают нам другие чувства и длительный опыт, выключаем из сознания все то, что мешает правильному восприятию объекта. Слепое пятно, например, постоянно мешает нам видеть весь предмет, но мы этого никогда не замечаем, и только специальный опыт убеждает нас в его существовании. Мы не замечаем также и аббераций глаза, хотя они настолько велики, что должны были бы значительно ухудшить изображение предметов. Именно вследствие приспособляемости глаза мы можем не замечать того, что мешает правильному восприятию объекта. Так, например, если у человека, употребляющего очки, разобьется одно из стекол, то трещина будет мешать ему первое время, а затем он привыкнет к ней и перестанет ее замечать. Однако из-за таких свойств нашего зрения глаз легко может быть обманут, а иногда, попадая в незнакомую обстановку, становится беспомощным.

Характерными примерами несоответствия между зрительными ощущениями и действительной картиной являются так называемые «зрительные иллюзии», или «оптические обманы». Глаз может совершать ошибки при определении расположения предмета в пространстве, при определении его формы, размеров и рельефа. Легко допустимы ошибки в определении яркости и цветных оттенков света. Возможны также ошибки в определении движения предметов и т. д. Ошибки в восприятии рельефа и глубины наблюдаемого пространства могут происходить по различным причинам. Значительную роль при этом играет сам психический акт осознания видимого зрителем образа. Но в некоторых случаях эти ошибки могут возникать вследствие физиологических особенностей зрительного аппарата, создающего, например, ощущение рельефа какого-либо плоского изображения в случае неодинакового восприятия этого предмета правым и левым глазом наблюдателя.

Ниже мы остановимся на рассмотрении некоторых случаев зрительных иллюзий, возникающих при восприятии пространства и зависящих

то тех или иных причин. К числу иллюзий, зависящих от общих психологических закономерностей нашего восприятия, таких, как ассимиляция, т. е. уподобление одного образа другому, контраст, противопоставляющий один образ другому, вмешательство истолковывающих представлений и других, могут быть отнесены иллюзорные восприятия меняющегося рельефа в рисунке. Так, изображенная на рис. 42 раскрытая книга может представляться лежащей корешком к нам, но при пристальном рассматривании рисунка она вдруг начинает казаться нам раскрытой в другую сторону, т. е. удаленной корешком от нас.

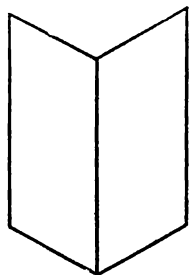


Рис. 42.- Стереоскопическая иллюзия: меняющегося рельефа раскрытой книги

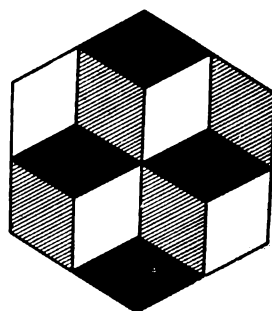
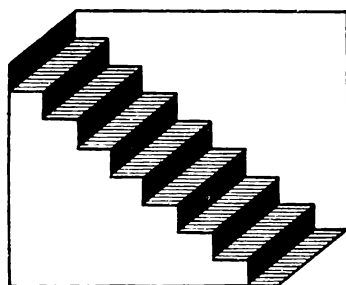


Рис. 43. Иллюзия меняющегося рельефа «лестница—карниз»

Такого же рода иллюзия изображена на рис. 43. Рисунок слева может восприниматься как изображение лестницы, но его же можно представить себе изображающим углубленную в стене нишу, и, наконец, на рисунке можно представить идущие по его диагонали бумажные полоски, согнутые в виде гармошки. Другая иллюзия такого же характера наблюдается на изображении, воспроизведенном справа. На этом рисунке изображены три куба. При продолжительном рассматривании нам представляются попеременно то два куба, расположенные наверху рисунка, а один внизу, то наоборот: один наверху, а два внизу. В этой иллюзии большую роль играет борьба наших представлений в определении предмета и фона. Интересная иллюзия такого же рода изображена на рис. 44. Здесь мы видим воткнутые в книгу булавки. Если рассматривать этот рисунок глазом из точки, находящейся приблизительно там, где пересекаются мысленные продолжения изображенных линий, то можно увидеть булавки как будто стоящими вертикально и как бы приподнятыми над плоскостью рисунка. При легком перемещении рисунка из стороны в сторону булавки кажутся даже качающимися.

Оценка нами расстояний в значительной мере зависит от цветной окраски рассматриваемых предметов. Так, можно заметить, что ярко освещенные или окрашенные в белые, желтые, красные цвета предметы кажутся всегда ближе, чем тусклые или предметы темного цвета. В некоторых случаях наблюдается появление рельефа при рассматривании цветных предметов на окрашенном фоне. В этом случае возникают как бы плавающие цвета. Так, например, было замечено, что при рассматривании в лупу марки, имеющей изображения желтого и синего цвета, пятна желтой окраски представляются нам как бы плавающими впереди над плоскостью самой марки. Можно заметить, что предметы крупных размеров, например большие суда, группы деревьев и т. п., кажутся ближе к наблюдателю, чем предметы, находящиеся на том же удалении, но меньших размеров. Предметы, находящиеся над нами в воздухе, кажутся меньшими, чем если они наблюдаются нами у горизонта и находятся от нас на таком же

расстоянии. В результате этой иллюзии многим приходилось удивляться кажущейся большой величине восходящей Луны и уменьшению кажущегося ее размера, когда она стоит высоко над горизонтом. Как будто в первом положении она ближе к нам, а вблизи зенита удалена дальше. Такое же впечатление производит самолет, летящий над нами и наблюдаемый у горизонта.

Эти, а также многие другие иллюзии зрительного восприятия пространства еще нуждаются в объяснении. Так, некоторые считают, что значительную роль в подобного рода изменениях видимого рельефа играет аккомодация глаза. То, что мы фиксируем, и то, на что мы аккомодируем, нам кажется ближе. В тех же случаях, когда фактическое изменение аккомодации устранено, роль в порождении иллюзий заменяется остающимся у нас стремлением к такому изменению аккомодации. Другие пытались объяснить такого рода иллюзии движениями глаза, нечеткостью изображения, получаемого на периферических местах сетчатки, и т. п. Вообще же возникновения зрительных иллюзий, конечно, объясняются не только этими причинами, но, как мы уже заметили, в значительной мере особенностями нашей психики, создающей изменение, истолковывание и оформление видимого нами.

Вторичные факторы стереоскопического видения при их использовании могут придавать плоскому изображению значительную силу пластичности и рельефа. Умело используя законы перспективного рассматривания, пространственные ориентиры, рельеф, вызываемый светотенями, явления воздушной перспективы, явления цветных контрастов, вызывая ложные аккомодационные стимулы и, наконец, подменяя объемный параллакс, обуславливающий бинокулярный стереоэффект, временным параллаксом, создающим пластику движения, можно получить полную иллюзию глубины и пространственности воспроизводимой картины. Этот эффект пространственности, объемности изображения, обусловленный ложным представлением бинокулярного видения о действительном рельефе и о положении в пространстве реального изображения, иногда называется квазистереоскопией. Квазистереоскопические средства преследуют цель устранения бинокулярного видения плоскости или той поверхности, на которой находится рассматриваемое изображение.

Однако эта иллюзия не всегда производит законченное впечатление объемности изображения. Дело в том, что, рассматривая пластическое изображение, например спроецированное на плоский киноэкран, зритель обоими глазами видит плоскость самого экрана; бинокулярное ощущение самой плоскости экрана довлеет над вторичными факторами стереоскопического видения, вынуждающими воспринимать пространственную глубину изображения. В таком случае стереоскопический эффект от картины неизмеримо снижается, зритель уже не может мысленно согласиться на объемную трактовку сцены, и ощущение пространственного эффекта квалифицируется как пластическое.

Рельефность изображения можно значительно повысить, устраняя возможность бинокулярного видения плоскости экрана. Так, рассматривая изображение на экране одним глазом или через трубку, огра-

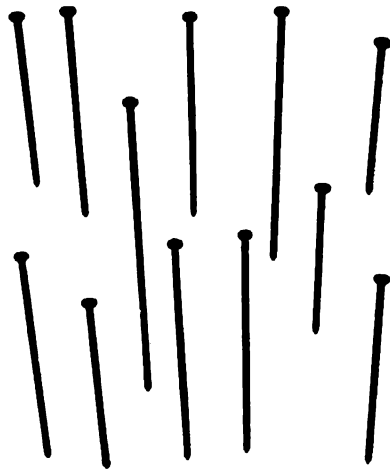


Рис. 44. Зрительная иллюзия вогнутых булавок

ничающую поле зрения глаза только экраном, можно получить полную иллюзию пространственной картины, совершенно не связанную с плоскостью экрана. Такое монокулярное наблюдение используется для получения впечатления рельефа при рассматривании картины фотографического изображения. В кинотеатре уменьшение видимости поверхности экрана достигается использованием широкого и полукруглого экранов. Возможно, в будущем будут использованы и другие средства, которые позволят устранить зрительное восприятие самой плоскости экрана.

Средства, позволяющие устранить видимость плоскости экрана, основываются на псевдобинокулярном стереоэффекте и на так называемом эффекте «воздушных изображений». Псевдобинокулярный стереоэффект заключается в том, что каждому глазу зрителя дается возможность видеть не вполне совпадающие два изображения одной и той же картины, не являющиеся сопряженной стереопарой. Если бы эти два изображения были сопряженными изображениями стереопары, то зритель видел бы подлинную стереоскопическую картину. Но если эти два изображения не являются сопряженными изображениями стереопары, а только несовпадающими, возникает пространственное отделение предметов изображения от плоскости экрана, не совпадающее с действительным пространственным расположением этих предметов. Однако этого уже иногда бывает достаточно для того, чтобы оторвать образ предметов от экранной плоскости (т. е. уничтожить восприятие плоскости экрана); задача же завершения построения пространственного образа лежит на работе других факторов стереоскопического видения, перспективы и т. п.

Псевдобинокулярный стереоэффект может выражаться еще и в том, что видимое изображение только несколько отделяется от поверхности экрана, делая невидимой самую плоскость экрана, или может далеко отодвигаться за плоскость экрана вглубь; при этом получается так называемое воздушное изображение. Значительное удаление изображения за плоскость экрана выгодно отличается в том отношении, что одновременно с разрывом связи изображения с экранной плоскостью усиливается пластика изображения; так как при рассматривании предметов на значительных расстояниях фактор бинокулярного видения теряет свою силу, другие факторы стереоскопического видения, использованные для создания пластического эффекта, выдвигаются на первое место.

Обращаясь к психологическим моментам (путем которых имеющаяся уже в любом изображении пластичность может быть повышена посредством наблюдения его действительного воздушного изображения), следует еще раз указать на то обстоятельство, что наше представление об объеме само по себе требует разрешения объемного толкования воспринятого подвижного изображения. При этом каждая существенная для нашего глубинного зрения вторичная физиологическая функция зрительного процесса используется для объемного истолкования изображения. Одним из таких моментов является возможность передвижения внимания или взгляда по глубине. При наблюдении предмета в природе мы никогда не фиксируем его неподвижным взглядом, но проходим по нему вдоль по его контурам и от одного предмета к другому.

Действительное воздушное изображение допускает возможность передвижения взгляда по сравнению с задним фоном или рамой экрана, причем эффективное передвижение взгляда и внимания может быть равноценно одно другому. Если мы направим наше внимание на некий движущийся на переднем плане объект, то остальные предметы мы можем (в силу их перспективного расположения и изменения положения относительно движущейся фигуры) мысленно перенести в воздушное пространство между изображением и задним фоном в соответствии с их расположением по глубине.

К этому надо добавить еще склонность истолкования таких действи-

тельных воздушных изображений, как рельефных. При этом сама плоскость изображения будет играть роль плоскости совпадения, на которой лежат все точки оригинала, совпадающие со своим изображением. Задний план образует так называемую главную плоскость, в которой изображаются бесконечно удаленные точки. Не исключено, что при рассмотрении изображений в вогнутом зеркале коробление поля изображения, вызванное астигматизмом, только подтверждает, усиливает такое пространственное впечатление.

При наблюдении действительных изображений в линзовых или зеркальных системах пучки лучей, исходящие из каждой точки изображения, идут для каждого глаза с другого места выходного «зрачка», т. е. поверхности зеркала. Оба глаза воспринимают два равных, неразделенных изображения. Здесь следует еще упомянуть, что при наблюдении картин и рисунков передачи глубины становится более наглядной, если наблюдать изображение посредством бинокулярного зрения с соблюдением правильно восстановленной перспективы. Пластическое действие зависит в первую очередь от того, в какой степени наше представление об изображении склонно к объемному его толкованию.

Глава II

ОПТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

§ 1. Классификация основных способов воспроизведения пространственных изображений. § 2. Воспроизведение пластических изображений. § 3. Оптическая репродукция пространственных изображений. § 4. Воспроизведение интегральных пространственных изображений. § 5. Стереоскопическая репродукция пространственных изображений. § 6. Общие принципы рассматривания стереоскопических пар изображений. § 7. Стереоскопы. § 8. Эклипсная система сепарации стереоскопических изображений. § 9. Цветные анаглифы. § 10. Поляризационные системы сепарации стереоскопических изображений.

§ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ СПОСОБОВ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Основные способы воспроизведения пространственных трехмерных изображений могут быть разделены на две большие группы. Первая группа объединяет способы, основанные на принципах объективного физического построения пространственного изображения. Вторая группа объединяет способы, основанные на принципах субъективного психофизиологического построения пространственного изображения.

Методы объективного построения пространственных изображений основываются на создании физически существующих независимо от сознания зрителей макетов воспроизводимых пространственных объектов. Группа этих методов в свою очередь может быть подразделена на а) методы, преследующие физическую имитацию изображаемых объектов, и б) методы, ограничивающиеся оптической имитацией изображаемых объектов.

К методам, физически имитирующим воспроизводимые пространственные объекты, можно отнести: а) скульптурное воспроизведение, б) воспроизведение при помощи объемного макета, в) воспроизведение патуры посредством кулисной панорамы, например театральной декорации, и др.

К методам оптической имитации изображаемых пространственных объектов следует отнести методы, ограничивающиеся оптическим построением пространственного образа, реально существующего, но неосознаваемого, а чисто оптического, т. е. созданного оптическими лучами. К этой группе должны быть причислены: а) метод интегральной фотографии, б) воспроизведение объемных изображений в зеркалах, в) воспроизведение оптических изображений в линзовых системах, например в микроскопе, телескопе и др., г) воспроизведение пространственной картины методом центральных проекций в объемных дымчатых экранах, на многоплоскостных полупрозрачных экранах и т. п.

Вторая группа способов построения пространственного изображения основывается на физиологических особенностях зрительного восприятия человека. Эти методы не стремятся к действительному физическому построению реальной копии изображаемых объектов. Точно так же, как при воспроизведении цветной картины, нет необходимости воспроизводить детальную физическую копию оригинала с его точной спектральной харак-

теристикой, а можно (в силу физиологических особенностей зрительного восприятия человека) воссоздать лишь тождественную с оригиналом цветную окраску изображения при помощи трех (или нескольких) частичных компонентов изображений с элементарными цветами, так и для получения впечатления пространственности изображения можно обойтись без построения физической копии изображаемых объектов, а ограничиться одним или несколькими плоскими рисунками воспроизводимых объектов. В этом случае пространственная картина не будет физически реальной, а будет обязана своим возникновением исключительно субъективному психофизиологическому построению пространственного образа зрителем в его сознании.

Методы, основанные на принципах субъективного построения пространственного изображения, можно разделить на три основные группы: 1) методы воссоздания пространственного образа, основанные на монокулярном стереоэффекте, т. е. на психофизиологических законах стереоскопического восприятия пластики изображения; 2) методы, основанные на последовательно-временном стереоэффекте, создающие пластику движения, свойственную киноизображениям; 3) методы, основанные на эффекте бинокулярного стереоскопического видения, которые и получили наименование собственно стереоскопических способов (в узком смысле этого слова).

На монокулярном стереоэффекте основывается в первую очередь получение пространственного восприятия обычных фотографических изображений и изображений, нарисованных (живопись, графика) с соблюдением законов перспективы и др. Группа методов, основывающих получение эффекта пространственности изображений за счет пластики, может быть подразделена на средства: а) графики и живописи; б) фотографирование обычное (и с использованием «мягкорисующей» оптики); в) способы, использующие рассматривание изображения с определенных точек зрения или одним глазом; г) способы, использующие специальные проекционные экраны для получения так называемых воздушных изображений.

К методам, использующим для создания пространственной картины последовательно-временной стереоэффект, следует отнести: а) способы съемки с движения («железнодорожный эффект»); б) методы переменных фокусных расстояний («псевдоглубинный параллакс»); в) способы создания кинематографической пластики изображений, использующие и монокулярный стереоэффект и последовательно-временной динамический стереоэффект.

К методам бинокулярной стереоскопии относится самая большая группа способов стереоскопического воспроизведения изображений включающая: а) способы с использованием призматического и отражательного стереоскопа; б) эклипсные (обтюрационные) способы; в) способы цветной аддитивной и субтрактивной анаглифии; г) поляризационные способы; аддитивные и субтрактивные, в том числе «стереовектограф»; д) способы автостереоскопии (растровой стереоскопии); е) проекционные методы безочковой бинокулярной стереоскопии с радиально-растровыми экранами; ж) способы безочковой бинокулярной стереопроекции с ячеистым экраном; з) способы безочковой бинокулярной стереопроекции с интегральными экранами; и) способы ограниченной интегральной фотографии и отчасти к) методы псевдобинокулярной стереоскопии (воссоздающие так называемые воздушные изображения).

Для пространственного воспроизведения статичных картин совершенно бесспорное качественное преимущество имеют методы, использующие бинокулярный стереоэффект. Наиболее распространено в этой области применение обычного призматического стереоскопа. Однако безусловно шагом вперед в недалеком будущем будет применение растровых способов, позволяющих рассматривать бинокулярные стереоскопические изображения без каких-либо очков или других зрительных приспособлений.

**Классификация основных способов воспроизведения
пространственных изображений**

Основные принципы	Класс методов	Группа способов	Основные способы
I. Принципы построения объективного пространственного образа	А. Методы физической имитации пространственного образа	1. Скульптурное воспроизведение	а) Ваяние б) Лепка в) Резьба и др.
		2. Барельефы	а) Гравировка б) Гальванопластика и др.
		3. Объемный макет	а) Объемный макет б) Макетные модели и др.
		4. Кулисные панорамы	а) Разноплановые панорамы б) Кулисные декорации и др.
		5. Фотоскульптура	а) Фотомеханическая копировка рельефных изображений б) Фотокопировка рельефного изображения на хромированной желатине и др.
		6. Объемная фотограмма	Объемная фотограмма и др.
	Б. Методы оптической имитации пространственного образа	1. Объемные изображения в зеркалах	а) Мнимое изображение пространственного предмета в плоском зеркале б) «Призрачный букет» в вогнутом зеркале и др.
		2. Объемное изображение в линзовых системах	Рассматривание пространственного объекта через большую линзу и др.
		3. Объемные изображения в линзо-растворных системах	а) Интегральная фотография б) Упрощенные методы интегральной фотографии в) Параллакс-панорамограмма
			а) Графика б) Рисунок в) Живопись и др.
II. Принципы построения субъективного пространственного образа	А. Пластика перспективы (монокулярный стереозффект)	1. Плоская картина	а) Обычная фотография б) Цветная фотография и др.
		2. Фотографирование	а) Монокулярный «Весматривание плоских изображений из центра перспективы
		3. Перспективное рассматривание плоских изображений из центра перспективы	а) «Перспектоскоп» (рассматривание фотографий через трубочку) и др. б) «Перспектоскоп» (рассматривание фотографий через трубочку) и др.

Таблица 4 (продолжение)

Основные приемы	Классы методов	Группа способов	Основные способы
		4. Усиление рельефа фотоизображений светотеневым контрастом 5. Усиление пластики плоского изображения эффективным выбором глубины резко изображаемого пространства на изображении и за счет воздушной перспективы	Рельефное освещение при фотокиносъемке и др. а) Мягкорисующая фотооптика б) Способ кинопроекции с попеременной расфокусировкой изображения в) Система киносъемки с попеременной фокусировкой разных планов г) Киносъемка последовательно освещенных планов и др.
	Б. Пластика движения (последовательно-временной стереоэффект)	1. Киносъемка движущихся объектов 2. Киносъемка с движения	Обычная киносъемка игровых и динамичных сцен и др. а) Съёмка с движущегося транспорта б) Съёмка перемещающейся камерой в) Оптические перемещения точки зрения объектива во время съемки и др.
	В. Псевдобинокулярные методы	3. Киносъемка с чередующихся точек зрения 1. Уменьшение видности картинной плоскости изображения 2. «Воздушные изображения» 3. Псевдостереоскопические изображения	Киносъемка с двух последовательно чередующихся точек зрения и др. а) Специальное обрамление киноэкранов б) Широкоэкранный и панорамный проекция в) Проекция на просвет и др. г) Круговая панорама а) Полупрозрачные экраны б) Полупрозрачные занавесы перед экранами в) Многоплановые экраны г) Зеркальные экраны д) Рассматривание плоских изображений в вогнутых зеркалах е) Рассматривание изображений через большую линзу и др. а) «Пинакоскоп» б) Двойной «верант» (линзовый прибор)

Таблица 4 (продолжение)

Основные принципы	Классы методов	Группа способов	Основные способы
	Г. Бинокулярные методы с индивидуальными зрительными устройствами	1. Методы, использующие стереоскопы	в) Псевдобинокулярная стереокинопроекция и др. а) Стереоскоп без призм и зеркал б) Призматические стереоскопы в) Отражательные стереоскопы г) Комбинированные стереоскопы и др.
		2. Эклипсные (обтюрационные) методы	а) Эклипсная диапроекция б) Эклипсная кинопроекция
		3. Методы цветных анаглифов	а) Аддитивные методы б) Субтрактивные методы в) Полиграфические методы
		4. Поляризационные методы	а) Стереопроекция с поляризационными призмами и искусственными поляридами б) Стереоектограф в) Применение поляризационного растра
	Д. Бинокулярные методы (безочковые) без применения индивидуальных зрительных устройств	1. Сепарация стереоизображений классическими оптическими системами	а) Стереопроекция на вогнутое зеркало б) Стереопроекция через большую линзу в) Стереопроекция через зонную пластинку
		2. Сепарация стереоизображений параллельным растром	а) Автостереоскопия б) Параллакс-стереограмма с параллельным растром
		3. Сепарация стереоизображений радиальным растром	а) Неподвижный перспективный растр щелевой и линзовый б) Колеблющийся перспективный растр в) Многоплоскостные растры и др.
		4. Сепарация стереоизображений точечным растром	а) Точечная, растровая сепарация б) Селективный ячеистый экран с точечным растром и др.
		5. Сепарация стереоизображений оптическими системами, создающими параллельные зоны избирательного видения правого и левого изображений	а) Отражательные интегральные экраны б) Просветляющие интегральные экраны в) Поляризационно-растровые стереозраны

Таблица 4 (окончание)

Основные принципы	Классы методов	Группа способов	Основные способы
	Е. Панорамно-бинокулярные методы	1. Ограниченная интегральная фотография 2. Панорамные изображения на линзоворостровой пленке и на линзово-растровых экранах 3. Панорамно-стереоскопическая проекция ограниченного числа сопряженных изображений на растровых экранах	а) Параллаксная панорамограмма б) Ограниченная интегральная фотография и др. а) Панорамные изображения на линзово-растровой фотопленке б) Проекция на параллельный линзово-растровый экран панорамных изображений в) Проекция на радиальный линзово-растровый экран панорамных изображений а) Стереоскопическая проекция ограниченного числа стереопар на растровые отражательные экраны б) Позонная много-стереопарная проекция в) Стереопроекция «на просвет» многих пар сопряженных изображений и др.

В кинематографии актуальность имеют лишь те принципы воспроизведения пространственных изображений, которые обладают высоким совершенством передачи глубины картины и технически наиболее просто решают эту задачу. В первую очередь к таким способам относятся методы стереопластики, использующие широкие панорамные экраны и съемку кинофильма с движущейся точки зрения; к таким способам относятся методы безочковой бинокулярной стереоскопии с радиально-растровыми экранами и поляризационный способ.

Общее развитие средств воспроизведения пространственных изображений в искусстве и технике можно наглядно проследить по схеме классификации этих средств, приведенной в табл. 4 (стр. 62—65).

§ 2.- ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Очень давно известны средства, придающие изображению на картине пространственность, в частности законы геометрической и воздушной перспективы, выбор надлежащей точки зрения при рассматривании картины и т. д. С изложением основных принципов этих законов в живописи можно встретиться у Леонардо да Винчи (1452—1519 гг.) и еще ранее.

Использование таких средств при стереоскопическом воспроизведении изображений также крайне важно.

Стереоскопическая пара изображений, предназначенная для рассматривания в обычном стереоскопе, не дает реального ощущения про-

странства, если она выполнена с неестественной перспективой, с неестественным распределением светотеней и без учета влияния других факторов, обуславливающих объемную трактовку картины.

С другой стороны можно заметить, что даже обычное кинематографическое изображение в смысле передачи рельефа весьма выгодно отличается от простого фотографического изображения. Неподвижные фотографические изображения на киноэкране оживают; на экране предметы начинают двигаться, перемещаться друг относительно друга, поворачиваться. Ожившая картина производит несравненно большее ощущение стереоскопичности, чем неподвижное изображение.

Соединение средств получения монокулярного стереоскопического эффекта со средствами пластики движущихся изображений послужило основанием для ряда предложений стереопластического воспроизведения киноизображений.

К таким предложениям относятся способы пластической кинопроекции, основанные на использовании псевдобинокулярного стереоэффекта при проекции на линзовый экран, при проекции на просвет, на темный и черный экран, применение экранов с обрамленными краями и ряд других подобных предложений. Эффективность всех этих предложений наиболее полно проявляется только при кинематографической проекции движущихся изображений или снятых с движения.

Псевдоглубинный эффект иногда используется для усиления пластичности и рельефа фотографических изображений. Для этого применяется съемочная оптика, рисующая отчетливо только план, в котором находится главный предмет, на котором должен фиксироваться взор, передавая все другие планы и фон более или менее размыто, нерезко. В этом случае фотографическое изображение отождествляется с характером видимого действительного предмета при рассматривании его аккомодированным глазом. Активная работа аккомодации при рассматривании подобной фотографии дополняет впечатление естественности рельефа.

Но не всегда получается хорошее впечатление рельефа на фотографиях с четким рисунком одного главного объекта и нерезкими, размытыми очертаниями остальных планов и фона. В том случае, когда эта нерезкость чрезмерно подчеркнута, предмет и отдельные детали снимка, не имея достаточной связи с окружающей обстановкой, кажутся свободно парящими в воздухе, а так как наш опыт распространяет пределы активных аккомодационных явлений на небольшую глубину, практически не далее 6 м, то пространство на изображении кажется сокращенным по глубине. Такое изображение уже не обладает пластикой, которая достигается только когда все предметы кажутся отделенными друг от друга и обладающими пространственными формами.

Для достижения лучшей гармонии в передаче глубины пытались снизить общую резкость изображения, чтобы сохранить одинаковую резкость для всего занимаемого изображением пространства. Для этого при фотографировании применялись различного рода насадочные линзы и сетки. При такой общей размытости изображения эффект пластичности, вероятно, возникает из-за того, что глаз получает некоторую неуверенность в восприятии формы предмета, построение которой дополняется подсознанием, что и обуславливает пространственную законченность образа. Возможно, что это обстоятельство может быть объяснено и тем, что нерезкий размытый фон фотографического изображения психологически воспринимается скорее не как аккомодационная нерезкость, а как подчеркнутая воздушная перспектива. Во всяком случае, снимки, сделанные с достаточной четкостью переднего и дальнего планов, при соблюдении условий передачи воздушной перспективы дают хорошее пространственное впечатление.

Аккомодационный стереоэффект для изображений, рассматриваемых со значительного расстояния, не может быть значительным. Однако

искусственными приемами можно заставить зрителя напрягать глаза ложными аккомодационными стимулами. К таким искусственным приемам можно отнести ряд способов пластической кинопроекции. В одном из них предлагалось проецировать кинематографическое изображение на обычный экран с помощью особого оптического приспособления, периодически выводя изображение из фокуса и вновь фокусируя его. Эффект действия такого устройства сводится к тому, что глаза зрителей видят то резкое, то нерезкое изображение, что и вызывает некоторые ложные усилия аккомодации глаза. Само собой разумеется, что этот способ не может иметь практического интереса, так как он достигает сомнительного эффекта усиления пространственности кинематографического изображения лишь за счет зрительного утомления.

Усиление пластичности изображения, основывающееся на таком же вызывании ложных стимулов аккомодационных усилий, пытались достичь в кинематографии путем чередования резкостей разных планов или последовательного изменения глубин резкостей, но все эти попытки не нашли практического применения, поскольку крайне незначительно усиливали рельеф и пластичность изображения и сопровождалась зрительным утомлением.

Периодическое изменение резкости разных планов достигалось путем пульсирующей наводки объектива на фокус. В этом случае съемочный объектив во время экспонирования изображения совершает пульсирующие колебания вдоль своей главной оптической оси, вследствие чего достигается последовательно чередующаяся резкость разных планов изображения.

Из методов последовательного изменения глубин резкостей наиболее известен способ, который состоит в том, что в процессе киносъемки периодически изменяется открытие диафрагмы. При этом меньшему открытию диафрагмы соответствует большее время экспозиции, а большему открытию диафрагмы — меньшее время экспозиции. Очевидно, при таком способе съемки будет последовательно изменяться глубина пространства, передаваемая с достаточной степенью резкости.

К этим способам близко примыкает процесс получения пластических фильмов, основывающийся также на принуждении глаза периодически следовать взором на разноудаленные планы. Для этого на экран в быстрой последовательности проецируются разноудаленные планы изображений. При проекции разных планов экран совершает некоторое колебательное движение, то приближаясь, то удаляясь от зрителя, или же разные планы изображения проецируются на ряд полупрозрачных сетчатых плоскостей экрана, установленных одна за другой. Съемка в этом случае производится путем последовательного освещения различных планов снимаемой сцены. Снимаемая сцена освещается параллельными рядами ламп, которые следуют друг за другом по глубине всей сцены. При зажигании каждого ряда ламп освещается узкая световая рамка, охватывающая сцену с боков и сверху так, что получается как бы контур разреза снимаемых объектов световой плоскостью, перпендикулярной к оси съемочного объектива. При съемке эти световые рамки непрерывно движутся одна за другой, создавая периодически повторяющийся ряд перемещающихся вглубь световых плоскостей.

Стереоскопический эффект киносъемки с движения проявляется в случаях относительного перемещения съемочного объектива и снимаемых объектов. Наибольшей силы стереоскопический эффект достигает в тех случаях, когда при относительном движении объектива и снимаемого объекта последний подвергается оглядыванию с боковых сторон, и меньше всего в тех случаях, когда при относительном движении объект остается на одинаковом расстоянии от объектива и обращен к нему одной и той же лицевой стороной. Поэтому лучший стереоскопический эффект дают те изображения, при съемке которых съемочный аппарат описывает движение

по дуге или по кривой вокруг снимаемых объектов, или те, при съемке которых снимаемый объект поворачивается вокруг своей оси перед объективом.

В свое время автором предлагалось устройство для замены движения съемочной камеры движением установленных перед съемочным объективом двух зеркал, соответственно изменявших положение точки зрения объектива. В таком устройстве одно зеркало устанавливается перед объективом наклонно к его оптической оси, другое укрепляется почти параллельно первому, на некотором расстоянии от него. Во время съемок эти зеркала, не изменяя взаимного расположения по отношению одно к другому, вращаются вокруг оси объектива, что равносильно круговому движению оптической оси по конической поверхности. При этом вершина конуса, образованного движением главной оптической оси объектива, может лежать как в плоскости снимаемого объекта, так и в любой другой плоскости, даже позади съемочной камеры. Попытки автоматизировать вращение зеркал оказались неудачными, так как при проекции снятых таким способом изображений зритель быстро утомляется от вращательного движения.

Многие изобретатели пытались достичь пластического эффекта при съемке всего с двух последовательно чередующихся точек зрения. Однако практические результаты при проверке этих предложений оказались неудовлетворительными. Несмотря на некоторый эффект пластичности, зритель чувствовал скачкообразное качание, прыгание и мелькание изображения на экране. Лучшие результаты при такого рода съемках и проецировании чередующихся правых и левых изображений были достигнуты лишь при очень малых боковых смещениях объектива. Оказалось, что пластический эффект становится заметным на экране уже при смещении точки зрения съемочного объектива порядка всего 5 мм. Образование пластического эффекта при последовательном рассматривании предмета с различных точек зрения основывается на законах перспективы движения.

В том случае, если изображение воспроизводит глубину пространства за счет вторичных психофизиологических факторов стереоскопического видения, без участия бинокулярного стереоэффекта, а последний используется для создания ложного представления о пространственном местонахождении самого изображения, изображения, как мы уже говорили, называют псевдостереоскопическими.

Средства получения псевдобинокулярного стереоэффекта создают для каждого глаза рассматривающего изображения, некоторые небольшие и в то же время несходственные искажения. Вследствие этого глаза зрителя, как и при бинокулярном рассматривании, видят пару сопряженных, но не идентичных изображений. В процессе психофизиологического совмещения этих изображений и возникает рельефное, пространственно не связанное с плоскостью картины изображение.

Псевдобинокулярный стереоэффект послужил основой для конструирования ряда оптических приборов, создающих пространственную иллюзию при рассматривании обычных ординарных фотоснимков. Такие приборы для рассматривания фотографий, сконструированные с линзами, известны под названием «В е р а н т ы», а с вогнутыми зеркалами — р е ф л е к т о с к о п ы. Один из «Верантов» представлен на рис. 45.

Рассматривая фотографический снимок через линзу или через вогнутое зеркало двумя глазами, мы видим слегка искаженные фотографические изображения. Эти искажения не совсем одинаковы для правого и левого глаза наблюдателя. Благодаря некоторому несоответствию, которое получается при наблюдении изображения правым и левым глазом, создается ложное впечатление о рельефе той поверхности, на которой это изображение зафиксировано. Психофизиологические факторы, обуслов-

ливающие восприятие пространственной глубины известных нам по форме предметов, дополняют работу нашего сознания в истолковании пространственной картины наблюдаемых изображений. Благодаря этому при рассматривании таких изображений действительно наблюдается известная пространственность и рельефность видимой картины. Прибор двойной «Верант» устроен аналогично обычному стереоскопу. В нем оба рассматриваемых изображения представляют идентичные, т. е. контактные, фотоотпечатки с одного и того же негатива.

Эффект, наблюдаемый на приборе двойной «Верант», может быть получен и с помощью обыкновенного стереоскопа, в который для рассматривания устанавливаются не стереопара, а два идентичных изображения. Конечно, для получения хорошего эффекта пластичности рельефа изображения рассматриваемая фотография должна обладать рядом свойств, способствующих ее пластическому восприятию: иметь достаточное количество деталей, богатство светотеней и перспективную глубину.

Значительное влияние на восприятие рельефности изображения, получаемого с помощью большой выпуклой линзы или с помощью вогнутого сферического зеркала, очевидно, имеет тот факт, что в вогнутом зеркале

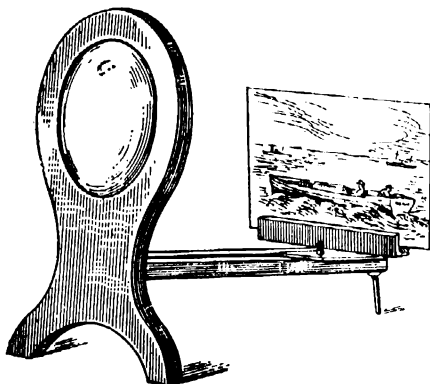


Рис. 45. Линзовый прибор «Верант»

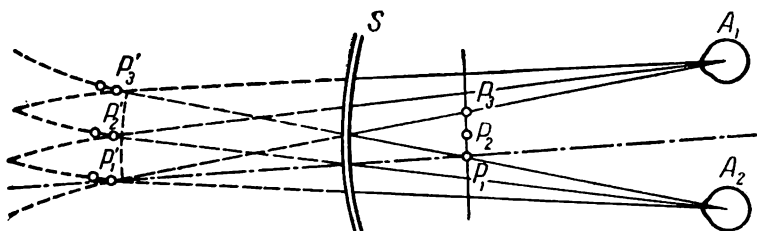


Рис. 46. Рассматривание изображения в вогнутом зеркале

(так же как в увеличительной линзе) каждый глаз зрителя видит не совсем одинаковые изображения.

На рис. 46 показано, как видит в зеркале один глаз A_1 три точки P_1 , P_2 , P_3 плоского предмета, находящегося перед вогнутым зеркалом S , и как видит эти три точки другой глаз зрителя A_2 . Очевидно, некоторое несовпадение изображений от одного и того же предмета на сетчатках обоих глаз вызывает у зрителя психологическое ощущение, приближающееся к ощущению настоящего бинокулярного видения, при котором изображения на корреспондирующих точках сетчатки обоих глаз отличаются параллаксом, соответствующим удаленности предмета.

Для получения пластического эффекта предлагалась сходная система проекции с использованием обычного плоского зеркала вместо вогнутого. Изображение при этом проецировалось проектором на зеркало, лучи от которого отражались на экран, где фокусировалось изображение. Зрители рассматривали изображение на экране через это же плоское зеркало, имевшее соответственно большие размеры. Так как при этом способе проекции никакой относительной трансформации изображений, видимых

правым и левым глазом зрителя, не было, то и пластический эффект получался несравненно более слабым.

Однако заслуживают некоторого внимания детали этого предложения. Чтобы скрыть от зрителя истинное положение плоскости экрана, предлагалось устанавливать перед экраном, на некотором расстоянии от него, широкую черную рамку, а для скрытия от глаз зрителей луча от проекционного аппарата — вести проекцию на просвет. Устранение видности проекционного луча при проекции на просвет безусловно выигрышно сказывается на увеличении реальности кинематографического изображения. Точно так же установка черной рамки на значительном расстоянии перед экраном (или другая какая-либо художественная световая маскировка краев экрана) позволяет в значительной степени уменьшить ощущение плоскости самого экрана, что выигрышно сказывается на увеличении пластичности изображения.

Для устранения видности плоскости самого экрана предлагались различные типы экранов: сетчатые экраны, просвечивающие черные экраны, дымчатые экраны, экраны с искривленной поверхностью, даже «ватные» экраны. Однако ни одна из этих конструкций практически себя не оправдала.

Особо можно остановиться разве на получении так называемых «воздушных изображений». Один из таких способов издавна использовался в театрах для показа «привидений» и «духов». По этому способу изображения предметов отражаются посредством невидимого для публики зеркала на наклонную, частично посеребренную или вовсе не посеребренную стеклянную плоскость. Позади нее находится непрозрачный экран, который снабжен кулисами. Зритель видит воздушное изображение на известном расстоянии перед непрозрачным экраном. Таким же образом был осуществлен способ, известный под названием «Кинопластикон». При этом способе одна стеклянная плоскость заменялась газовой или тюлевой завесой.

В значительной мере зрительное ощущение плоскости картины можно устранить, если эту картину сделать очень больших размеров, чтобы в поле зрения зрителя не попадали края картины. В этом случае зритель бинокулярно не может определять плоскость экрана и картина ему начинает казаться не привязанной к какой-либо определенной плоскости.

Этим объясняется в значительной мере реалистичность изображений, нарисованных на больших полотнах. Но с особенной силой этот эффект реалистичности и пространственности изображенной картины проявляется в круговой панораме. В этом случае бинокулярное ощущение поверхности, на которой нарисована картина, совершенно пропадает и определение глубины изображенного пространства психологически составляется только из вторичных факторов стереоскопического зрения. Тот, кто видел, например, нашу всемирно-известную круговую панораму «Оборона Севастополя на Малаховом кургане», — тот может оценить всю силу реалистичности глубины воспроизводимого пространства. Этот эффект в последнее время используется для повышения пластичности при воспроизведении кинематографических изображений в широкоэкранном и панорамном кино, а также в круговой кинопроекции, иногда называемой циклорамой.

Принципиальная схема панорамной кинопроекции на широкий вогнутый экран, как это сейчас осуществляется с помощью трех проекторов, изображена на рис. 47. За счет динамики движения кинематографического изображения и особенно при съемке кинокартины движущимся аппаратом пластический эффект получается настолько сильным, что даже получил особое название «эффект присутствия».

Эффект присутствия сравнивают сейчас по силе действия с бинокулярным стереоэффектом. В действительности ряд сцен с удаленными планами, лежащими далеко за плоскостью экрана, в панорамном кино не усту-

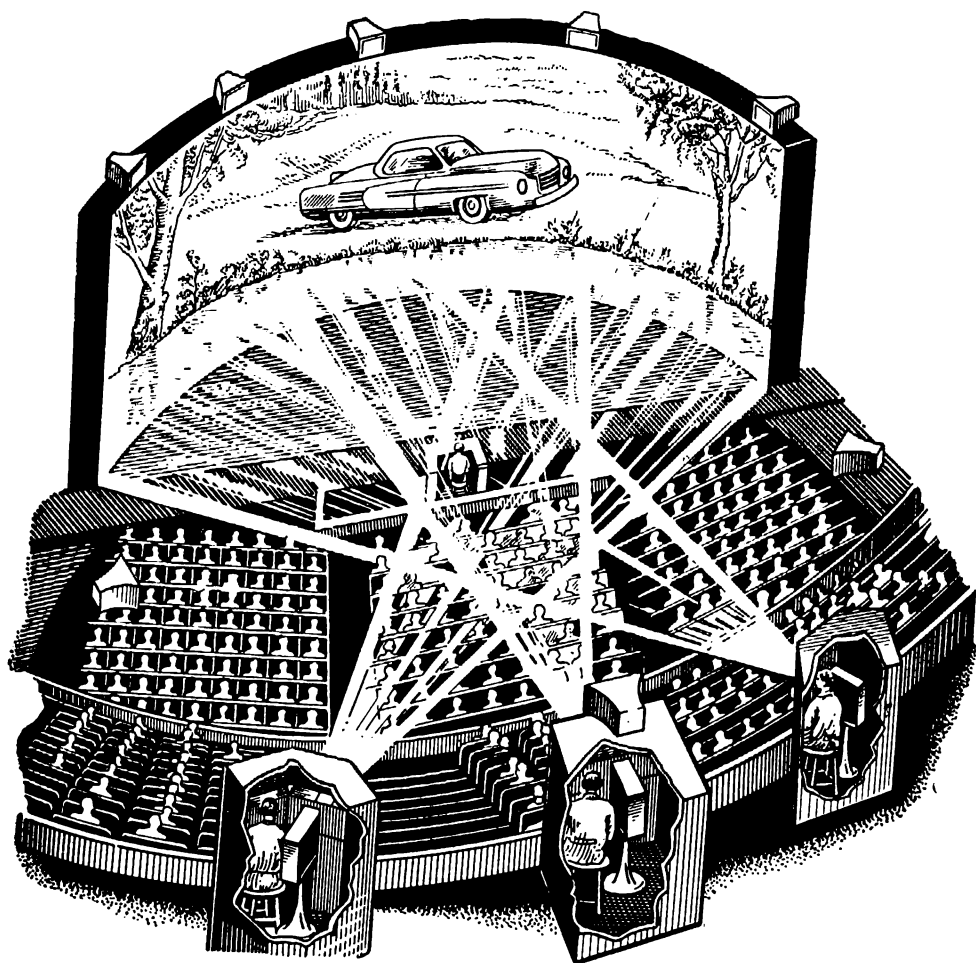


Рис. 47. Схема панорамной кинопроекции, осуществляемой тремя проекторами

пает по пластичности таким же изображениям, воспроизводимым в стереокино, так как бинокулярный стереоэффект при рассматривании таких планов играет незначительную роль по сравнению с другими факторами зрительного определения глубины рассматриваемой картины. Не уступают в пластике и изображения, снятые с движения. Однако положение меняется при показе на экране панорамного кино изображений, снятых с неподвижной точки зрения, и особенно, когда на этих изображениях объекты находятся на переднем плане или они должны выступать с экраном в пространство зрительного зала. Обеспечить такую пластичность изображения может только бинокулярный стереоэффект.

Однако панорамное и широкоэкранное кино в отношении воспроизведения пластики изображения намного превосходит обычное кино. Пластичность панорамного и широкоэкранного кино придает большую реалистичность изображению. И поэтому этот вид кинематографа пользуется большим успехом у зрителей. Широкоэкранное кино получило большое распространение как в Советском Союзе, так и за рубежом. Теперь начинает получать распространение панорамное кино. Уже в 1958 г. в Советском Союзе открылось два панорамных кинотеатра — в Киеве и в Москве, а в 1959 г. в Москве на ВДНХ открылся кинотеатр круговой панорамы.

3. ОПТИЧЕСКАЯ РЕПРОДУКЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рельеф и пространственность изображаемого предмета могут быть переданы путем построения объемного макета этого предмета. Макет — это такое же физическое пространственное тело, как и сам изображаемый предмет, пропорционально уменьшенный или увеличенный. Объемный макет является средством физической имитации пространственной картины. Построение его для изображения предметов применяется в искусстве с доисторических времен. К объемному макету могут быть причислены скульптурные изваяния, барельефы, собственно объемные макеты и объемные модели, разноплановые объемные панорамы, кулисные декорации.

Несмотря на всю громоздкость построения объемного макета, известны некоторые попытки использования этих средств даже для получения кинематографического изображения. К таким попыткам прежде всего следует отнести предложения о применении многослойных и объемных фотографий и предложения по осуществлению фотоскульптуры. Так, для получения пространственных киноизображений было предложено воспользоваться показом так называемой объемной фотограммы. Объемная фотограмма по этому замыслу должна представлять собой ряд снимков, получаемых с одной и той же точки зрения, но с изменяющейся глубиной резкости.

Для пояснения принципа приведем пример. С помощью фотокамеры, снабженной длиннофокусным объективом большой светосилы, т. е. объективом с малой глубиной резкости, делаются три снимка, скажем ландшафта. При этом один раз резко наводится на фокус дальняя цепь гор, затем — дом, находящийся на среднем плане, и, наконец, дерево вблизи от камеры. Вследствие ограниченной глубины резкости объектива каждый раз получаются резко лишь те предметы, на которые была сделана наводка. Все прочее получается более или менее нерезко. С этих трех негативов изготавливаются диапозитивы, приводимые в точности в те положения, которые занимала каждый раз при съемке светочувствительная пластинка. При рассматривании на светлом фоне можно будет установить, что цепь гор, находящаяся на заднем плане, и дерево на переднем плане разделены между собой пространством среднего плана. Таким образом, снятый объект разделяется также на три зоны глубины. Синтез частичных изображений такой системы представляется, как объемная фотограмма. Количество составляющих элементов определяет в каждом отдельном случае тонкость пластического эффекта. Если бы сделать с пространственного объекта бесконечно большое количество съемок различных плоскостей, то тогда и тонкость передачи пластичности возросла бы бесконечно. Объемная фотограмма могла бы в этом случае быть не чем иным, как объемной (макетной) передачей снятого пространственного объекта в уменьшенном масштабе.

Объемный макет пространственных объектов мог бы быть в принципе получен непосредственным фотографированием того рельефного изображения, которое получается в фокусе объектива съемочного аппарата, если бы можно было каким-либо образом этот оптически постепенно уменьшающийся рельеф изображения фиксировать в объемном слое фоточувствительного материала.

Запечатлеть этот оптический рельеф предлагалось с помощью фотохимических процессов на пластинке с толстым слоем хромированной желатины в качестве светочувствительного вещества. Хромированная желатина задубливается под действием световых лучей на тех участках, на которые попал свет. При обработке такой пленки горячей водой можно вымыть незадубленную желатину, а оставшаяся невымытой задубленная светом желатина оставляет на пленке рельефное изображение. Этот процесс получил название фотопластики или фотопластографии. Однако

трудно представить, что подобные средства физической репродукции изображений могут быть практически применимы для получения объемных фотографических или кинематографических изображений. Если бы такой фотопроект был осуществим, то уже не встретила бы затруднений оптическая репродукция полученных таким образом рельефных изображений. Рассматривая масштабно сокращенный рельеф такого изображения через оптическую систему, например через большую линзу, можно восстановить естественные пространственные соотношения сфотографированного объекта.

Каждый элемент поверхности реального тела является как бы центром, из которого исходят световые лучи. По направлению хода этих лучей, попадающих в глаза человека, последний судит о пространственном местонахождении данного элемента. Однако точно такой же зрительный эффект, как от поверхности реального тела, может быть получен от оптического изображения этого тела, например от изображения его в зеркале. Изображение, видимое в зеркале, обладает такой же пространственностью, как и реальная действительная картина. Очевидно, что изображение предмета, видимое в зеркале, является простран-

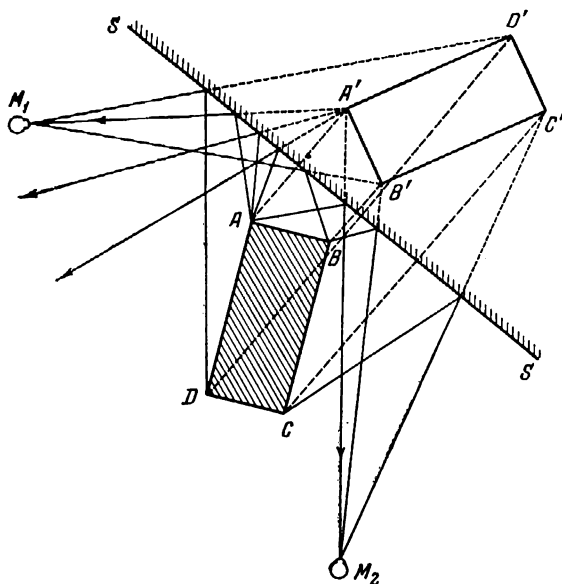


Рис. 48. Пространственное изображение предмета $ABCD$ в мнимом пространстве плоского зеркала

ственным и объективно существующим независимо от лица, наблюдающего его.

Объективное пространственное существование оптического изображения положено в основу ряда способов построения пространственных изображений действительной картины. К этим способам относится получение оптического изображения в плоском и вогнутом зеркалах, получение пространственных изображений в оптических линзовых системах и фиксация пространственного оптического изображения с помощью интегральной фотографии.

1. Объективная реальность пространственного существования изображения в плоском зеркале наглядно видна при рассмотрении схемы построения изображения в зеркале от пространственного объекта (рис. 48). Изображение $A'B'C'D'$, видимое в зеркале, занимает совершенно определенное положение в пространстве, определяемое положением объекта $ABCD$ и отражающей плоскости зеркала SS , являющейся плоскостью симметрии для изображения и объекта. Куда бы ни поместился наблюдатель, он всегда из положений M_1 , M_2 и т. д. увидит точку A предмета, находящуюся в положении A' . Все лучи, исходящие от точки A , отражаются зеркалом SS по таким направлениям, как если бы эти лучи исходили из мнимой, реально несуществующей точки A' .

Точно таким же образом лучи, исходящие из всех элементов тела $ABCD$, отразятся зеркалом SS и создадут мнимое, но объективно существующее изображение $A'B'C'D'$, расположенное во мнимом пространстве за зеркалом. Объективность существования оптического простран-

ственного изображения можно проверить, рассматривая это изображение с разных точек зрения, находящихся перед зеркалом ΔS ; так, например, из точки M_1 будут видны две боковые стороны $A'B'$ и $A'D'$, а из точки M_2 можно увидеть уже другие стороны изображения $A'B'$ и $B'C'$. Мнимое пространственное изображение в плоском зеркале своим существованием неразрывно связано с тем пространственным предметом, отражением которого оно является. После устранения предмета от зеркала изображение его бесследно исчезает.

2. С помощью вогнутого сферического зеркала можно получить пространственные изображения (мнимые и действительные) от предмета, находящегося перед зеркалом. Если предмет находится далеко от зеркала,

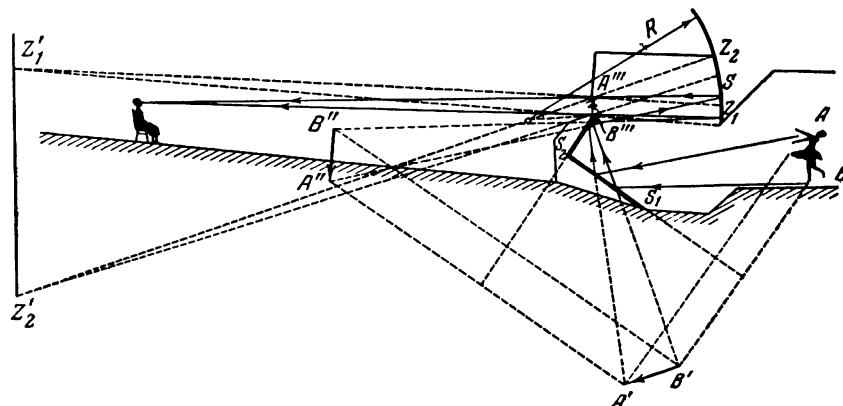


Рис. 49. Иллюзия «театр марионеток»

то изображение будет получено перевернутым, уменьшенным, свободно висящим в воздухе между фокусом и центром зеркала; наоборот, если предмет находится между центром и фокусом зеркала, то будет получено увеличенное перевернутое изображение на большом расстоянии перед зеркалом. При нахождении предмета в центре зеркала изображение совпадает с предметом, но получается перевернутым.

Изображения, даваемые сферическим зеркалом, объемны, но перспективно искажены. Небольшой рельеф предмета, находящегося около фокуса зеркала, обуславливает глубокий рельеф изображения. Изображение объемного предмета, одни элементы которого лежат в фокусе зеркала, а другие — в центре зеркала, получается растянутым по глубине от центра зеркала до бесконечности.

Применение вогнутых сферических зеркал для получения рельефных изображений с объемных предметов известно давно. Примером построения рельефного изображения с помощью вогнутого сферического зеркала может служить устройство сцены театра марионеток (рис. 49), в котором для оборачивания изображения применена дополнительная комбинация плоских зеркал. Если предмет AB находится перед плоскими зеркалами S_1 и S_2 , стоящими под углом, то зеркало S_1 дает изображение $A'B'$, лучи от которого падают на зеркало S_2 и образуют перевернутое изображение $A''B''$. Далее лучи падают на вогнутое зеркало S , которое дает изображение $A'''B'''$, вторично его перевертывая. Таким образом, изображение в сферическом зеркале получается прямым; оно находится около фокальной плоскости зеркала. Зрителю, от которого края вогнутого зеркала скрыты, предмет кажется рельефным и свободно режущим в воздухе.

3. Так же как с помощью вогнутого сферического зеркала получают рельефные пространственные изображения, так пространственное изображение от объемного предмета может быть получено и с помощью

большой линзы. Только в этом случае предмет и изображение находятся по разные стороны линзы. Для этой же цели вместо обычной линзы может быть применена комбинация линз по типу схем микроскопа или телескопа. Оптическая система, подобная схеме микроскопа, может служить не только для воспроизведения объемного изображения малых предметов, но и в других случаях. Такую систему, например, предлагалось использовать для естественного воспроизведения увеличенного изображения оратора или лектора, демонстрирующего какие-либо опыты и т. п.

§ 4. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Воспроизведение интегральных изображений имеет целью создание оптической объемной панорамы, видимой невооруженным глазом из любой точки пространства, находящегося перед ней. Получаемая объемная панорама должна воспроизводить сфотографированные объекты в таком же относительном пространственном размещении, как они расположены в натуре. Рассматривая объемное изображение, полученное этим методом, зритель должен получить такое же представление, как если бы он смотрел на панораму, открывающуюся в окне. При приближении к интегральному оптическому изображению зритель увидит, как и при приближении к окну, что предметы, находящиеся за окном, становятся ближе к нему, панорама картины расширяется, меняются перспектива и угловая величина предметов. При отклонении зрителя в сторону от окна он видит новые предметы, может заглянуть сбоку на то, что находится за рассматриваемыми предметами, может увидеть предметы в новом ракурсе. Совершенно такое же восприятие пространственности наблюдаемой картины должно получаться и при рассматривании интегрального изображения.

Если при стереоскопической проекции зритель, наблюдающий пространственное изображение, изменит место своего наблюдения, то и наблюдаемый образ переместится в пространстве, изменив несколько свой рельеф. При воспроизведении интегральных изображений пространственный образ для всех точек наблюдения одинаков и не меняет своего рельефа при наблюдении его зрителем из разных положений.

Воспроизведение интегральных изображений можно осуществить при помощи растровых оптических систем, которые воспроизводят пространственное изображение первоначального объекта путем оптической интеграции элементарных плоских изображений этого предмета, получаемых растровой системой.

Получение пространственных интегральных изображений основывается на принципах интегральной фотографии, изложенных Г. Липпманом в 1908 г. в сообщении, сделанном им во Французской Академии наук. Пространственное изображение, полученное посредством интегральной фотографии, — это как бы закрепленные, зафиксированные изображения в зеркале, которые остались в нем после удаления предметов, отражением которых они являются. Метод назван интегральной фотографией потому, что изображение в данном случае суммируется (интегрируется) из огромного количества маленьких микроскопических изображений.

Для получения интегральной фотографии Липпманом была предложена особая фотографическая пластинка, которая состоит из огромного числа маленьких линзочек, дающих каждая на светочувствительном слое свое микроскопическое изображение. Эти элементарные изображения отличаются друг от друга параллактическим сдвигом.

Процесс фотографирования на липпмановскую пластинку, составленную из большого числа линзовых элементов, происходит без посредства фотографической камеры, так как каждая линзочка пластинки служит

самостоятельным съемочным объективом. Пластинка устанавливается непосредственно перед фотографируемым объектом, обращенная преломляющей поверхностью к нему.

На светочувствительном слое линзовых элементов пластинки получается столько же изображений предмета, сколько линзочек имеет пластинка. На рис. 50 показано, как происходит съемка подобной пластинкой. Точка A снимаемого предмета дает на пластинке большое количество

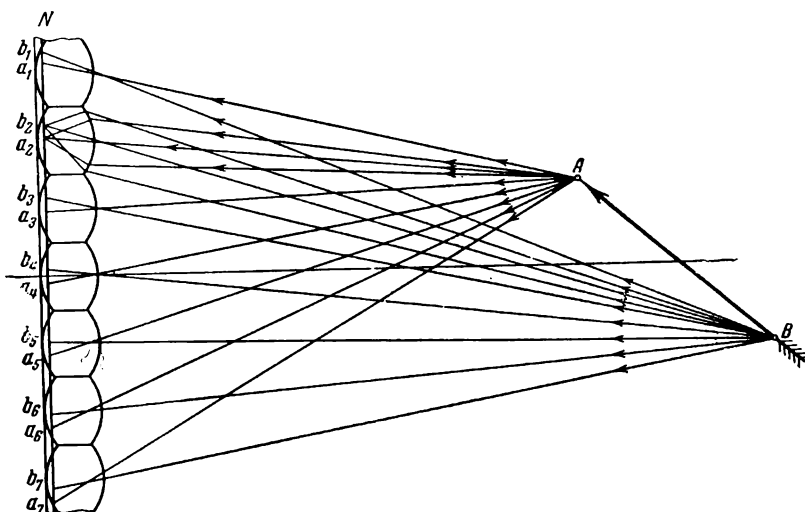


Рис. 50. Фотографирование интегрального изображения (AB — предмет, N — негатив)

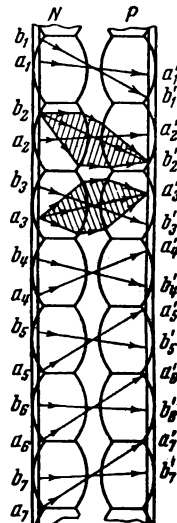


Рис. 51. Оптическая копия интегрального позитива P с интегрального негатива N

изображений — точки a_1, a_2, a_3, a_4 и т. д. От любой другой точки предмета, например B , получится ряд изображений b_1, b_2, b_3, b_4 и т. д. Проявленная и отфиксированная пластинка представляет собой негатив. Для получения позитива изображение с первой пластинки N копируют на такую же вторую пластинку P , как изображено на рис. 51.

Если проявленную и отфиксированную вторую пластинку P , представляющую собой позитив, осветить со стороны эмульсии и рассматривать со стороны линзочек, то можно будет увидеть предмет $A'B'$ висющим в пространстве на таком же удалении за пластинкой, на каком удалении от пластинки он был при съемке. На рис. 52 можно видеть, что при рассматривании изображения на интегральной фотографии глаз O_1 будет видеть только одно растровое (т. е. состоящее из точек) изображение предмета, так как в глаз попадают лучи только от отдельных точек изображения, полученных за каждой линзочкой. Если переместить глаз в другое положение O_2 и рассматривать интегральную фотографию с другой точки зрения, глаз увидит несколько отличное изображение предмета $A'B'$, так же как он увидал бы несколько измененное изображение предмета при рассматривании действительного реального предмета.

При рассматривании предмета двумя глазами лучи, идущие от каждой точки предмета в один и в другой глаз, при мысленном продолжении за пластинку пересекаются, воссоздавая иллюзию действительного предмета, находящегося в пространстве за пластинкой. Так, например, лучи, попадающие в глаз O_1 и во второй глаз O_2 , могут быть продолжены за пластинку P , где оба луча пересекаются в точке A' , в результате чего

зритель воспринимает точку A' , лежащую в пространстве за пластинкой. Точно так же воспринимаются в пространстве за пластинкой и все другие точки видимой поверхности предмета.

Воспроизведение полноценного интегрального изображения до настоящего времени не удалось еще осуществить. Современные технические средства пока не обладают возможностями, которые позволили бы сейчас

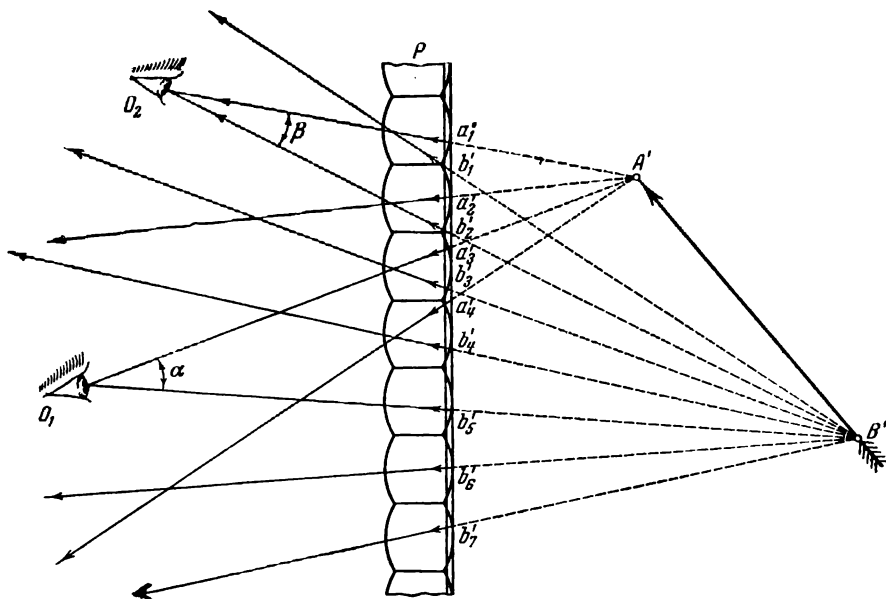


Рис. 52. Рассматривание позитива интегральной фотографии со стороны линзочек восстанавливает пространственное положение предмета $A'B'$

практически решить эту задачу в полной мере. Чрезвычайно большие трудности технического порядка возникли при изготовлении требуемых фотографических пластинок из набора линзовых микроскопических элементов.

Практическая проверка принципа интегральной фотографии впервые была осуществлена методом стенопа, т. е. методом фотографирования через маленькие отверстия. А. П. Соколов в 1911 г. опубликовал свои опыты по проверке липпмановского метода. Для получения интегральной фотографии им была взята фибровая пластинка толщиной в 3 мм, размером 15×20 см. По всей ее поверхности было просверлено 1200 маленьких конических отверстий (рис. 53). Для обеспечения правильности и равномерности расположения маленькие отверстия были просверлены на отдельном тонком медном листе, наложенном затем на фибровую пластинку со стороны вершин конусных отверстий b ; с противоположной стороны a перед экспозицией накладывалась обыкновенная фотографическая пластинка, обращенная эмульсией к отверстиям (рис. 53, а). Конические отверстия в фибре играли роль маленьких фотографических камер, а маленькие отверстия в медном листике — роль объективов. В результате дифракционной фокусировки получались сравнительно четкие изображения на светочувствительном слое фотографической пластинки.

При проведении опыта фотографировалось несколько светящихся точек, в качестве которых служили электрические лампочки. Диапозитив приготавлился с помощью той же фибровой решетки. С этой целью перед негативом N со стороны стеноскопических отверстий устанавливалась вторая пластинка D (рис. 53, б) симметрично с первой, т. е. тоже на

расстоянии 3 мм от отверстий. При этом достигалось полное соответствие отдельных снимков, получающихся на диапозитиве, снимкам на негативе.

В процессе опытов Соколов обнаружил, что рельефные изображения светящихся точек можно было получать и без изготовления диапозитива, а рассматривая изображение со стороны негатива так, чтобы свет сначала проходил через отверстие (рис. 53, в). При этом для получения позитивного изображения негатив должен быть фотографически обращен. При рас-

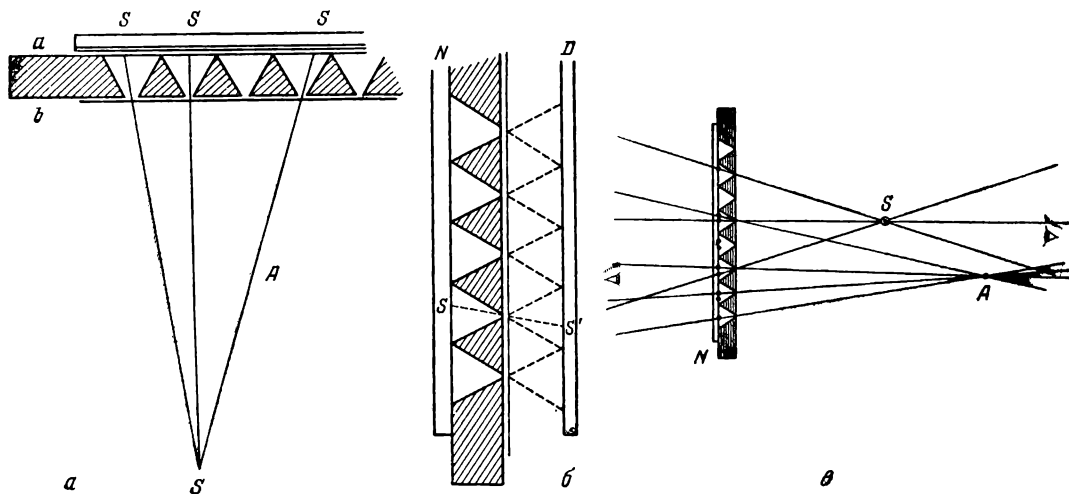


Рис. 53. Практическое осуществление интегральной фотографии Соколовым: а — съемка; б — копировка интегральной фотографии; в — рассматривание интегральной фотографии прямое и с обратной стороны

сматривании негатива с противоположной стороны (т. е. со стороны отверстий) наблюдатель будет находится в пространстве лучей, исходящих из негатива, и в тех точках этого пространства, где по отношению к негативу находились ранее светящиеся точки. Таким путем впервые были получены псевдоскопические изображения интегральной фотографии в пространстве перед интегральной пластинкой.

Более совершенная реализация интегральной фотографии была осуществлена применением фацетного зеркала для получения большого количества элементарных изображений а для фотографирования этих изображений использовалась обыкновенная фотографическая камера с одним объективом.

Взяв несколько плоских зеркал, можно их расположить таким образом, что каждое зеркало будет давать изображение одного и того же объекта с точки зрения, отличной от точек зрений других зеркал. Наблюдатель, смотря на установленные таким образом зеркала, увидит в каждом из них изображение одного и того же объекта. Ставя на место наблюдателя фотографическую камеру, можно сфотографировать на одной общей пластинке одновременно все эти изображения объекта, видимые с различных точек зрения. Для получения таким способом правильной интегральной фотографии требуется вполне определенная и точная ориентация отдельных зеркал. Грамонтень и Плановернь в своих опытах составили интегральное изображение на 100 элементарных изображений. Схема предложенного ими процесса фотографирования изображена на рис. 54.

Пусть А (рис. 54) является объектом, подлежащим съемке; для простоты рассуждений мы будем А предполагать точкой. Зеркала должны быть

расположены таким образом, чтобы мнимые изображения $A_1, A_2, A_3, \dots, A_{100}$, которые получаются от A , были расположены в одной и той же плоскости P и равномерно в этой плоскости распределены. Тогда изображения предмета, получаемые в них, можно одновременно сфотографировать. Примем за плоскость чертежа (рис. 54) плоскость, определяемую оптической осью объектива O и точечным объектом A . Эта плоскость содержит 10 мнимых изображений, расположенных в одном ряду A_1, A_2, \dots, A_{10} и центры десяти соответствующих зеркал M_1, \dots, M_{10} . Чтобы изображения A лежали на одной прямой, следы зеркал в плоскости рисунка

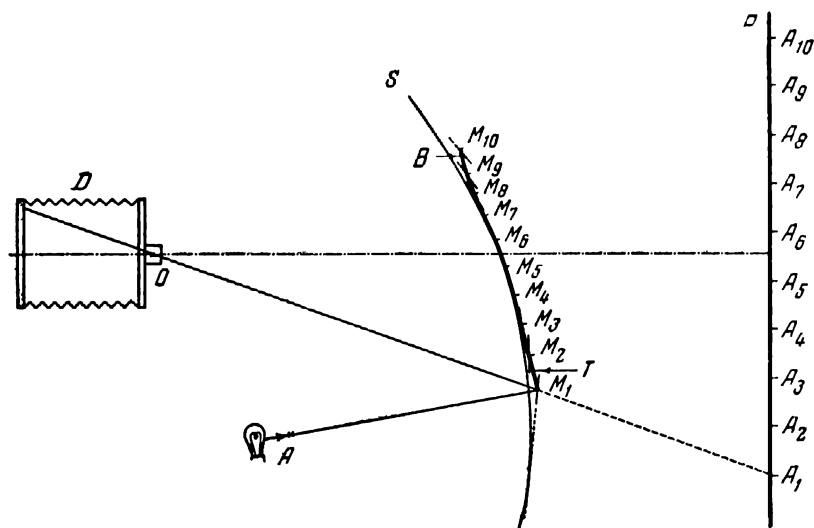


Рис. 54. Съемка интегральной фотографии через факетное зеркало (по Грамовтеню и Плановерню)

должны касаться параболы S , имеющей A фокусом и прямую A_1A_{10} директрисой. Можно заметить, что полезная часть M_1M_{10} этой параболы является почти прямолинейной. Другие зеркала, расположенные вне плоскости рисунка, дают аналогичную картину. Отсюда получается, что 100 зеркал располагаются приблизительно в одной плоскости, лишь с некоторым небольшим поворотом вокруг своих центров.

Осуществление настоящего способа производилось следующим образом. На доску наносился слой замазки толщиной в 1 см. На этой замазке помещались 100 плоских зеркал, которые занимали собой квадрат величиной 20×20 см. Затем на расстоянии 40 см перед обычным фотографическим аппаратом D (с форматом снимка 9×12 см) помещалась доска BC , несущая эти зеркала. Объектив фотоаппарата D имел диаметр отверстия, равный 4 см. Чтобы восстановленное изображение казалось непрерывным, необходимо, чтобы входной зрачок объектива имел диаметр больший, чем диагональ каждого зеркала. В качестве объекта A — снималась электрическая лампа с угольной нитью накаливания. Зеркала дают 100 изображений этой лампы, случайно расположенных, которые регулировались так, чтобы получить на матовом стекле 10 рядов из 10 изображений, правильным образом расположенных. Опыт показал, что таким образом все изображения на матовом стекле можно получить достаточно четкими. После регулировки производилась съемка негатива. Так был получен негатив, часть которого воспроизведена на рис. 55. Чтобы увидеть восстановленное пространственное изображение лампы, негатив снова закладывался в устройство (рис. 56) и рассматривался из точки O на расстоянии 2 м от зеркал.

При рассмотрении была видна черная нить на белом фоне; она обладала тонкостью проработки и глубокой чернотой, представлялась плавающей в пространстве, в точности на месте объекта. При этом не только был виден рельеф, но при боковом перемещении последовательно были видны аспекты, представленные в *a* и *b* (рис. 56), и все аспекты промежуточные.

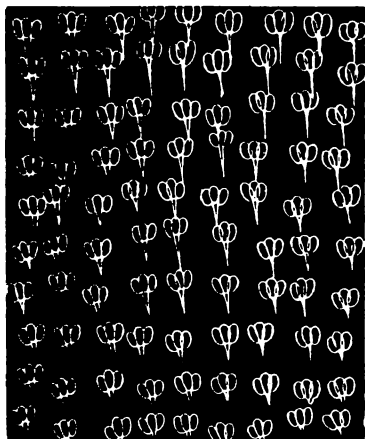


Рис. 55. Интегральное изображение нити лампочки

тательное изображение позади головы.

Первые успешные опыты по изготовлению интегральных фотографий на растровых пластинках со сферическими линзами, расположенными по

Если приближаться к изображению, то оно увеличивается. Если удаляться, то изображение уменьшается в точности так, как если бы удаляли самый объект. Изображение получилось, как и во всяком устройстве для интегральной фотографии, в результате оптического суммирования проекций всех элементарных изображений. Эти проекции в силу обращенного хода лучей взаимно пересекаются на месте объекта. Когда наблюдатель слишком приближается к изображению, он не может уже видеть его отчетливо, потому что находится вне минимального расстояния отчетливого видения. Если он помещается к зеркалам слишком близко, так что интегральное изображение оказывается позади него, он видит изображение опрокинутым и туманным для нормального глаза. Это получается вследствие помещения глаза в ход лучей, образующих действи-

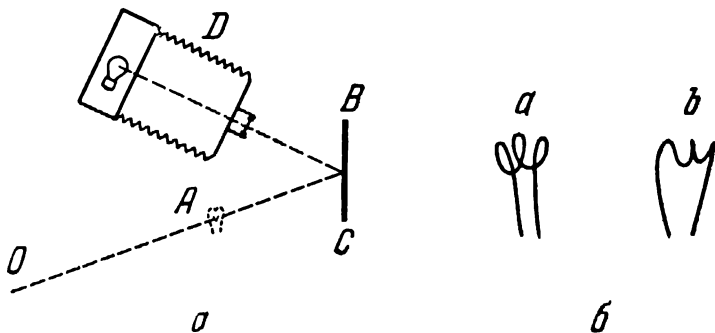


Рис. 56. Проекция интегрального изображения (a) и аспекты видимого изображения (б)

всему полю пластинки, были проведены С. П. Ивановым и Л. В. Акимкиной в 1948 г. Размеры отдельных линз на пластинке были следующие: диаметр 0,3 мм, фокусное расстояние 0,5 мм. Общее количество линз на пластинке было около двух миллионов.

Несмотря на то что в этих экспериментах фотографирование интегрального изображения производилось на обычную фотографическую эмульсию, качество изображения удалось получить очень высоким. При рассматривании интегральных фотографий, снятых непосредственно растром, можно было свободно перемещаться в пределах зоны видения и вправо—влево и вверх—вниз, не теряя впечатления рельефа. Хотя полученное изображение представляло негатив интегральной фотографии, который давал воспроизведение обратного рельефа, все же при передвижениях зри-

тель мог наблюдать непрерывное перемещение близких предметов относительно дальних. Проведенные опыты показывают, что в пространстве перед интегральной фотографией создается зона наблюдения картины, заполненная непрерывно меняющимися точками зрения.

§ 5. СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ РЕПРОДУКЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Получение стереоскопического изображения основывается на воспроизведении телесного объема предмета по двум проекциям, полученным из двух центров перспективы, расположенных на одной горизонтальной прямой, нормальной к визирной линии. Две картины, полученные на плоскости из этих двух центров перспектив, образуют нормальную стереограмму, изображения которой различаются горизонтальным параллаксом соответственных точек. Стереограмма может быть получена двумя способами: стереоскопическим фотографированием и графическим исполнением. Полученная стереограмма, как мы уже указывали выше, должна состоять из двух изображений, предназначенных для рассматривания одного правым, другого левым глазом наблюдателя.

С оптической точки зрения для естественного воспроизведения пространства стереоскопического изображения требуется соблюдение двух условий: 1) пространство предмета и пространство изображения должно быть ортоморфично, т. е. не искажено в пространственных масштабах, и 2) угловое соотношение между точками в пространстве предмета должно быть тождественно с угловыми соотношениями между соответствующими точками в пространстве изображения.

При соблюдении этих условий получается ортостереоскопическое изображение, т. е. стереоскопическое изображение, характеризующееся правильным рельефом, неискаженной перспективой и зрительным слиянием двух сопряженных изображений стереограммы в единый пространственный образ. Помимо этого, должно быть соблюдено соответствие углов и линейных размеров пространства предметов и пространства изображений, зависящее от изменения базиса съемки и от увеличения системы. При стереоскопическом воспроизведении согласно этим условиям может быть построено объемное изображение геометрически подобное действительному предмету.

Однако, как показывает практический опыт работы со стереоснимками, такое оптическое подобие недостаточно для получения вполне естественного представления о пространстве того объекта, который воспроизводится с помощью стереоскопического изображения. Очевидно, это несоответствие в восприятии стереоскопического, подобного натуре, пространства объясняется психофизиологическими особенностями зрительного восприятия человека. В некоторой степени это несоответствие можно объяснить тем, что на фотоснимке мы видим обычно уменьшенное, по сравнению с натурой, изображение предмета. Рассматривая такое уменьшенное изображение, мы стереоскопически воспринимаем его в виде «маленького макета», подобного естественному предмету. Рассматривая стереоскопически этот «маленький макет», мы смотрим на него с точек зрения фотографического аппарата, но фотографический аппарат, помещенный перед этим макетом тоже был бы уменьшен во столько же раз против природы, во сколько раз уменьшено объемное изображение воспроизводимого предмета. Следовательно, мы смотрим на стереоскопический «макет предмета» с уменьшенного базиса между точками зрения по сравнению с нормальным базисом между зрачками.

При рассмотрении такого макета на стереоснимке мы не охватываем зрением предмет с боков, как рассматривали бы действительный макет природы, уменьшенный в таком же масштабе. Очевидно, для получения точно

такого же впечатления, как если бы мы смотрели на действительный предмет непосредственно глазами, нам следует при съемке увеличить базис между точками съемки каждого изображения. Это увеличение должно быть таким, чтобы базис при рассматривании уменьшенного против натуры пространства стал равным расстоянию между зрачками наших глаз. Совершенно также при фотографировании малых предметов (например, в микроскопе) и при увеличенном воспроизведении их на стереоснимке необходимо съемочный базис между точками съемки правого и левого глаза уменьшить, чтобы при воспроизведении увеличенного пространства этот базис стал равным расстоянию между глазами наблюдателя.

В действительности точное следование правилам съемки с измененным базисом между центрами проекции правого и левого изображения стереограммы не дает вполне удовлетворительных результатов. Мы не получаем естественного представления о действительном пространстве снимавшейся натуры и об объеме фотографируемого предмета, а получаем впечатление лишь об уменьшенных или увеличенных «макетах» действительных предметов. Полное сходство мы можем получить только в том случае, когда увеличение изображения равно единице (т. е. изображение воспроизводит предмет в натуральную величину).

Таким образом, сохраняя базис съемки равным межзрачковому расстоянию, мы в полученной пространственной картине ставим наблюдателя в уменьшенное масштабное пространство стереоскопического изображения, т. е. наблюдатель должен представить себя уменьшенным (увеличение $v < 1$) или увеличенным до размеров великана (при $v > 1$), что, конечно, с трудом поддается осознанию. Изменяя базис между точками зрения фотографических объективов при съемке стереограммы, мы придаем «макетность» воспроизводимому пространственному объекту, т. е. строим оптический макет увеличенным ($v > 1$) или уменьшенным ($v < 1$) против натуры.

Практически, изменяя базис съемки, можно достичь естественного восприятия пространства, но не в тех пределах изменения базиса, которые вытекают из изложенных выше соображений. Поэтому многими фотографами-практиками предлагалось большое число эмпирических формул, дающих, по их мнению, хорошие результаты при стереосъемке тех или иных объектов.

Изготовление стереограммы можно производить, применяя:

а) съемку обычным фотоаппаратом (с одним объективом), перемещая его при съемке в две последовательные точки зрения (центры проекций). Такая съемка возможна только при фотографировании неподвижных предметов;

б) съемку фотоаппаратом с одним объективом, снабженным оптическими стереонасадками, представляющими специальные устройства, позволяющие одновременно делать два снимка предмета с двух точек зрения. Известны различные конструкции таких насадок: зеркальные, призмённые и др.;

в) съемку объекта фотоаппаратом с двумя объективами, смещенными по горизонтали на величину нормального стереоскопического базиса. Расстояние между объективами обычно остается неизменным. Но бывают и такие аппараты, у которых базис между объективами меньше или больше 65 мм или которые позволяют при съемке менять базис по мере необходимости;

г) графическое построение стереограммы чертежа, текста и других подобных рисунков. Для этого два рисунка, составляющие правое и левое изображение стереопары, строятся по законам геометрической перспективы из двух центров перспективы, разделенных соответствующим горизонтальным базисом.

Такие изображения можно строить и путем автоматического рисования с помощью специально разработанных приборов. Эти приборы выполняют

рисунок сразу двух изображений, причем, рисуя одно изображение, сразу же получают и второе изображение, но смещенное относительно первого на величину, получающуюся в результате наблюдения этого предмета с точки зрения другого глаза.

Для осуществления бинокулярной стереоскопической кинопроекции производится киносъемка двух серий последовательных изображений с двух точек зрения, соответствующих точкам зрения правого и левого глаза. Обычно расстояние между точками зрения объективов, снимающих стереоскопическую пару изображений, принимается также равным нормальному стереоскопическому базису. Однако для сохранения естественной передачи рельефа базис между точками зрения съемки правого и левого сопряженных изображений должен определяться в зависимости от фокусного расстояния съемочных объективов, от увеличения изображений при проекции на экран, от удаления зрителей от экрана и увеличения, даваемого окулярами, через которые зритель рассматривает изображение. Оптимальная величина базиса в каждом отдельном случае съемки определяется на основании пространственных соотношений в воспроизводимой стереоскопической картине, т. е. законов метрики стереоскопического пространства.

§ 6. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАССМАТРИВАНИЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ПАР ИЗОБРАЖЕНИЙ

Зрительное восприятие бинокулярной стереоскопической картины при рассматривании стереограммы возможно в том случае, если обеспечиваются условия сепарации правого и левого изображения стереограммы для соответствующих глаз зрителя. Но одного этого условия недостаточно. Необходимо еще, чтобы видимое каждым глазом частичное изображение стереограммы сливалось с другим частичным изображением, видимым другим глазом, в единый зрительный образ. Только такой зрительный образ будет представляться пространственным — стереоскопическим.

Самым простым способом наблюдения стереоскопической картины можно считать непосредственное рассматривание ничем не вооруженными глазами правого и левого изображения стереограммы. При таком рассматривании необходимо несколько развести глаза в стороны, т. е. смотреть как бы на очень удаленный предмет (рис. 57).

Дивергированными, т. е. разведенными, глазами приходится наблюдать стереоскопическое изображение в случае слишком широкой стереограммы, на которой соответствующие точки правого и левого изображения удалены друг от друга на расстояние, превышающее межзрачковый базис наблюдателя. В этом случае визирные оси глаз в предметном пространстве не пересекаются, а расходятся, их пересечение происходит лишь при мысленном продолжении за затылком. Такое сильное разведение глаз в стороны

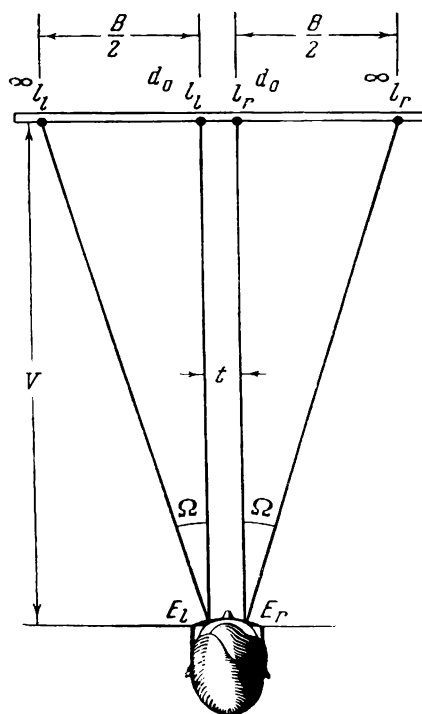


Рис. 57. Рассматривание стереоскопической картины дивергированными, т. е. разведенными, глазами

вызывает значительное напряжение зрительного аппарата и сопровождается сильным утомлением. Более спокойное наблюдение стереоскопического изображения возможно, когда расстояние между соответствующими точками правого и левого изображения стереограммы равно межзрачковому базису наблюдателя. В этом случае визирные оси глаз параллельны друг другу, т. е. глаза как бы смотрят в бесконечность. При более узких стереограммах наблюдение ведется уже несколько конвергированными глазами, т. е. когда визирные линии сведены на сравнительно близком расстоянии за плоскостью стереограммы. Такое наблюдение также утомительно вследствие затруднительности устойчивого сохранения постоянства конвергенции.

Научиться скашиванию глаз, необходимому для рассматривания стереоскопических изображений, не очень трудно. Путем некоторой тренировки можно легко этого достичь. Существуют различные вспомогательные приемы, облегчающие обучение раздельному рассматриванию правым и левым глазом соответственно своих изображений стереограммы. Один из таких приемов, использующий вспомогательный рисунок с двумя черными пятнами, нами уже был описан ранее. При рассматривании такого рисунка (см. рис. 6) слегка разведенными глазами, смотрящими как бы вдаль сквозь рисунок, черные пятна начинают плыть друг к другу и, наконец, налагаются друг на друга, сливаясь в одно общее пятно. Если при этом опыте рисунок держать косо, то слияния пятен не наблюдается: они проплывают друг мимо друга на разной высоте.

Чтобы совместить такие пятна, видимые на разной высоте, надо несколько повернуть рисунок перед глазами или немного наклонить в ту или иную сторону голову. Когда слияние пятен достигнуто, то мы замечаем, что, помимо одного общего изображения черных пятен, мы видим еще два пятна справа и слева от слитного изображения. Это происходит потому, что мы видим правым глазом не только одно правое изображение пятна стереограммы, но и левое изображение, а левым глазом видим и левое и правое изображение пятна. Теперь, когда мы достигли слияния правого изображения, видимого правым глазом, с левым, видимым левым глазом, у нас остались еще видимыми для правого глаза левое изображение пятна, расположенное слева от слитного изображения, и правое изображение пятна, видимое левым глазом справа от слитного изображения.

При непосредственном рассматривании стереограммы без стереоскопа обычно мы видим всегда три изображения. Среднее изображение представляет собой слитный образ правого и левого изображения стереограммы (это изображение кажется нам пространственным), а по бокам от него мы видим два плоских изображения стереограммы. Чтобы устранить видимость мешающих боковых изображений, очевидно, необходимо сделать так, чтобы правый глаз видел только правое, предназначенное ему изображение стереограммы и не видел левого изображения, а левый глаз видел одно левое изображение стереограммы.

Простейшим способом устранить видимость левого изображения стереограммы от правого глаза и правого изображения от левого глаза может служить загораживание этих изображений рукой, как показано на рис. 58. Вместо руки на некотором расстоянии перед глазами можно поместить ширмочку. Для достижения такого раздельного рассматривания правого и левого изображений стереограммы предлагались и другие простые устройства, выполненные в виде полых пирамидальных ящиков, в виде трубок, открывающих каждому глазу только одно, предназначенное ему изображение стереограммы. Все эти приспособления широкого распространения не получили, так как такое наблюдение стереоскопического изображения сопряжено со значительным зрительным утомлением.

Умение прямо рассматривать стереоскопические изображения непосредственно по стереограмме, однако, во многих случаях оказывается очень

ценным. В особенности это относится к лицам, работающим в области стереоскопических измерений, занимающимся стереоскопической фотографией и др. Умение рассматривать стереоскопические изображения без стереоскопа позволяет такому работнику по одному взгляду на стереограмму составить ясное представление о характере рельефа на данном стереоскопическом изображении. Если читатель пожелает потренироваться в такого рода непосредственном рассматривании стереограмм невооруженными глазами, то мы можем ему порекомендовать начать такую тренировку с более легких стереограмм, приведенных на листах III-V.

Для легкого зрительного совмещения правого и левого изображения стереограммы обычно пользуются оптическими приборами, называемыми стереоскопами, анаглифическими очками и другими зрительными приспособлениями или специальными экранами. Эти же приборы обеспечивают и сепарацию, т. е. раздельное видение правого и левого изображения стереограммы соответственно только правым или левым глазом. Сепарация сопряженных изображений стереограммы может осуществляться либо оптическими приспособлениями, помещаемыми перед глазами зрителя, либо специальными экранами направленного действия.

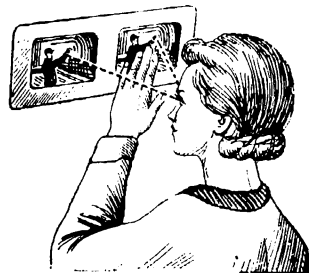


Рис. 58. Простой способ устранения видимости боковых не основных изображений, возникающих при непосредственном рассматривании стереограммы

Основными способами воспроизведения стереоскопических изображений при помощи индивидуальных зрительных приспособлений, осуществляющих сепарацию правого и левого изображения непосредственно у глаз зрителя, можно считать:

- 1) способы, использующие отражательные или преломляющие стереоскопы;
- 2) эклипсные (обтюрационные);
- 3) анаглифические и 4) поляризационные.

Способы безочковой стереопроекции основываются на сепарации правого и левого изображения при помощи специальных экранов направленного действия. По характеру создаваемых ими зон раздельного избирательного видения правого и левого изображений стереопары они подразделяются на экраны:

- 1) создающие только отдельные линии или точки избирательного видения;
- 2) создающие плоскость параллельных или радиальных линий избирательного видения;
- 3) создающие узловые точки избирательного видения в объемном пространстве перед экраном.

К первой группе должны быть отнесены зеркальные и линзовые экраны, ко второй — параллельно-растровые и радиально-растровые экраны и к третьей — многоячейковые или многолинзовые экраны.

По светотехническим характеристикам стереоэкраны делятся на экраны с щелевым растром и светосильные стереоэкраны с линзовым растром.

Глубина пространства, наблюдаемая при бинокулярном рассматривании стереоскопической картины, не зависит от оптических средств, применяемых для сепарации правого и левого изображения стереограммы. Эффект глубины стереоскопической картины не зависит также и от того, рассматриваем ли мы изображения стереограммы скошенными или разведенными глазами. Это легко понять. Ведь глубина пространства при бинокулярном зрении осознается только вследствие диспаратности изображений, видимых правым и левым глазом, т. е. в конечном счете оценивается по величине дифференциальных параллаксов соответствующих точек предмета, видимых правым и левым глазом.

Когда мы рассматриваем какой-либо объемный предмет, то на сетчат-

ках наших глаз получают два изображения, различные точки которого в зависимости от их удаленности от среднего плана обладают разным дифференциальным параллаксом. Если сфотографировать эти изображения, то на полученной стереограмме зафиксируются те же дифференциальные параллаксы для соответственных точек изображения. Поэтому как бы мы ни рассматривали впоследствии сфотографированные изображения стереограммы глазами с разведенными, параллельными или скошенными зрительными осями, — мы всегда получим один и тот же стереоскопический эффект.

В следующих параграфах настоящей главы мы рассмотрим основные типы индивидуальных зрительных приспособлений и методы использования их для наблюдения стереоскопических изображений.

§ 7. СТЕРЕОСКОПЫ

Бинокулярные оптические устройства, служащие для раздельного наблюдения правым и левым глазом соответственно своего частичного изображения стереограммы, называются **стереоскопами**. Такие оптические устройства, обеспечивающие сепарацию изображений стереограммы, создают так же условия для более легкого слияния видимых правым и левым глазом изображений в единый пространственный образ.

По своему устройству существующие стереоскопы можно подразделить на четыре типа: простые щелевые, с линзами или преломляющими клиньями, с зеркалами или отражающими призмами и комбинированные из первых трех типов.

Рассмотрим несколько подробнее каждый из этих типов стереоскопа.

Щелевой стереоскоп. Одним из наиболее простых зрительных приспособлений для рассматривания стереограммы является щелевой стереоскоп, который представляет собой ящик со щелью и с двумя отверстиями для глаз. Его устройство представлено на рис. 59.

Два изображения стереограммы *A* и *B*, соответствующие точкам зрения правого и левого глаза, помещаются перед щелью стереоскопа *C* в таком порядке, как это изображено на рисунке, т. е. правое изображение помещается слева, а левое — справа.

Рассматривание изображений стереограммы ведется через два отверстия *a* и *b*, сделанных в противоположных стенках ящика и служащих для фиксации положения глаз наблюдателя в тех точках, из которых должно производиться рассматривание стереоскопических изображений. Правый глаз зрителя, помещенный у отверстия *a*, увидит через щель *C*

предназначенное ему изображение *A*, а левый глаз через отверстие *b* увидит изображение *B*. Очевидно, что на сетчатке каждого глаза будут получены сопряженные изображения стереограммы, которые при психофизиологическом слиянии создадут пространственную картину, обусловленную бинокулярным стереоэффектом.

Рассматривание стереоскопической картины в щелевом стереоскопе сопряжено со значительным утомлением глаз, так как в процессе наблюдения стереоскопической картины происходит большое несоответствие между аккомодацией глаз и конвергенцией их главных оптических осей. Глаза аккомодируются на плоскость изображения *A* и *B*, в то время как их оптические оси конвергируются в плоскости щели *C*.

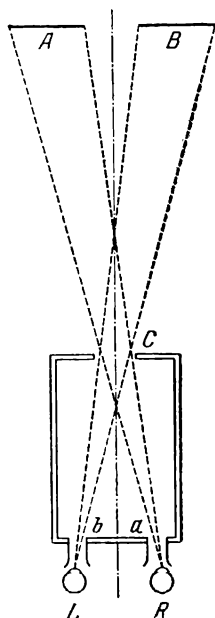


Рис. 59. Щелевой стереоскоп

Из рассмотрения схемы стереоскопа видно, что разрыв между аккомодацией глаз и их конвергенцией может быть уменьшен за счет приближения изображений A и B к щели C и за счет уменьшения ширины щели C . Очевидно, что при измененном удалении глаз от щели неизбежно будет уменьшаться и допустимая ширина изображений стереопары A и B , в результате чего через щель будет видна только узкая полоска изображения.

Линзовый стереоскоп. Примером стереоскопа преломляющего типа может служить обычный стереоскоп (рис. 60), впервые предложенный Д. Брюстером. В этом стереоскопе перед глазами зрителя помещены два преломляющих стеклянных клина или две половинки собирающей линзы,

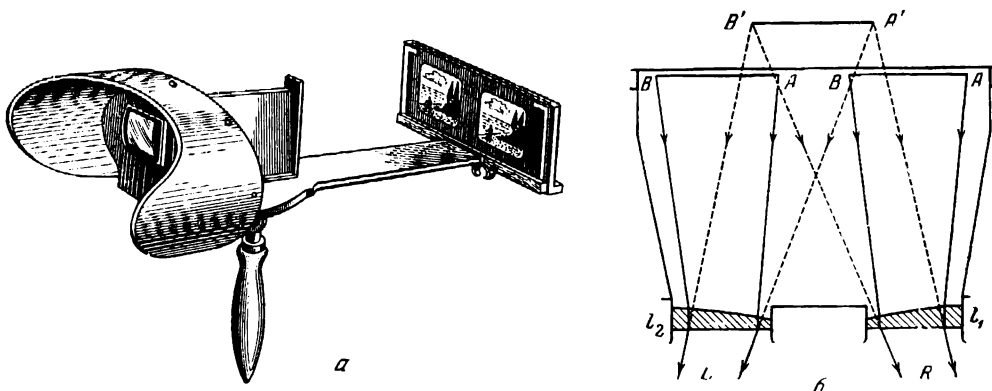


Рис. 60. Линзовый стереоскоп (а) и схема хода лучей в линзовом стереоскопе (б)

а за линзами расположена перегородка, загораживающая от правого глаза левое изображение стереограммы, а от левого глаза — правое изображение.

С помощью стеклянных преломляющих клиньев или линзовых элементов направление лучей, идущих от правого и левого изображений стереопары, изменяется так, что глаза автоматически видят каждый свое сопряженное изображение пространственно наложенным одно на другое, благодаря чему происходит свободное слияние обоих изображений в пространственную картину.

Схема хода лучей в преломляющем стереоскопе представлена на рис. 60, б. Правый глаз R смотрит через клин l_1 на правое изображение стереопары AB и вследствие отклонения лучей клином видит это изображение в положении $A'B'$. Точно так же левый глаз L через клин l_2 видит левое изображение стереопары AB также в положении $A'B'$.

При замене преломляющих клинов линзами получается увеличенное изображение.

В случае применения линзовых элементов поле зрения для каждого глаза ограничивается самими линзовыми элементами, и поэтому оказывается возможным делать такой стереоскоп без перегородки между линзами для ограничения пучков лучей, идущих от несоответствующих изображений стереограммы. Такой стереоскоп может быть сделан очень компактным.

Зеркальный стереоскоп. Примером стереоскопа отражательного типа может служить зеркальный стереоскоп, предложенный впервые Ч. Уитстоном в 1832 г. Этот стереоскоп широко применяется в технике и в настоящее время, в частности в рентгеностереоскопии. Устройство его показано на рис. 61. Два изображения стереограммы — левое A и правое B — рассматриваются соответственно левым L и правым R глазом через отверстия a и b в двух плоских зеркалах M' и M , стоящих под углом около

45° к оптическим осям глаз. Мнимые изображения стереограммы, видимые в зеркалах, налагаются друг на друга, и глаза наблюдателя видят одно слитное стереоскопическое изображение.

Вместо зеркал в отражательном стереоскопе могут применяться призмы полного внутреннего отражения. Для прямого наблюдения стереограммы применяются стереоскопы с двумя дополнительными зеркалами, установленными каждое параллельно основным зеркалам.

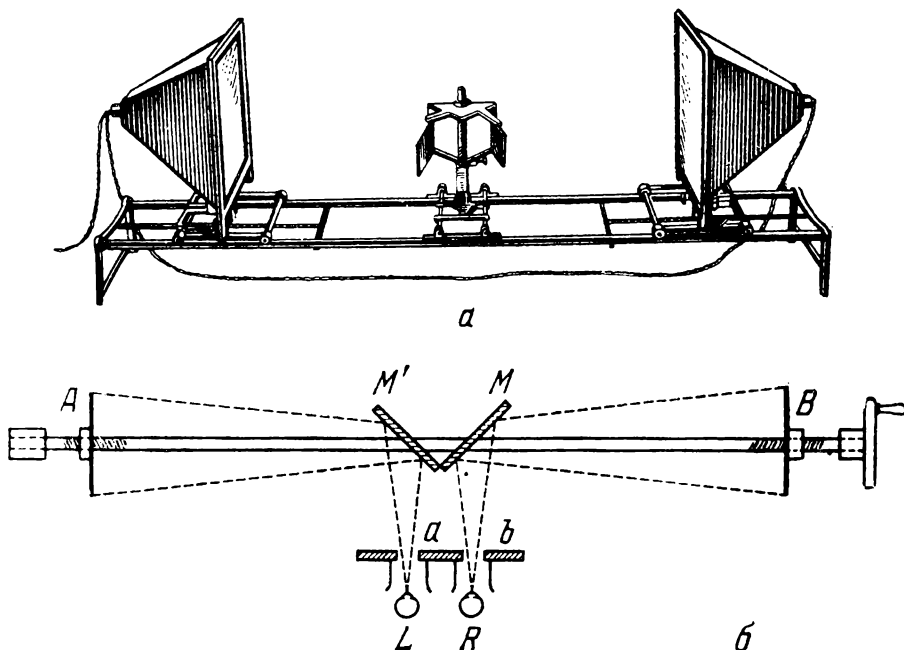


Рис. 61. Общий вид (а) и схема (б) зеркального стереоскопа

Комбинированные стереоскопы. Современные стереоскопы для измерительных целей и для точных наблюдений часто выполняются комбинированными. Одним из примеров такого стереоскопа может служить зеркальный стереоскоп, который снабжен сменными окулярами, дающими разное увеличение рассматриваемой стереоскопической картине. Путем использования переменного увеличения в этом стереоскопе можно изменять пластику наблюдаемого стереоскопического изображения.

Применяемые в настоящее время стереоскопы крайне разнообразны по своему конструктивному выполнению. В некоторых стереоскопах предусматривается возможность изменения расстояния между окулярами в соответствии с межзрачковым расстоянием у наблюдателя.

Для просмотра стереограмм, выполненных на пленке или на пластинках в виде диапозитивов, применяются стереоскопы ящичного типа, позволяющие последовательно просматривать подряд большое количество стереоскопических изображений.

Стереоскопы, снабженные окулярами, обладают одним очень существенным достоинством по сравнению с другими зрительными приборами, применяющимися для рассматривания стереоскопических изображений. Возможность установки окуляров по глазам наблюдателя позволяет подравнивать аккомодационную установку глаз в соответствии с их конвергенцией. Это обстоятельство приводит к уменьшению зрительного утомления при рассматривании стереоскопических изображений через такие стереоскопы.

Обычно стереоскоп служит индивидуальным зрительным прибором, при помощи которого один зритель рассматривает стереограмму. Однако известны попытки применить стереоскопы для одновременного наблюдения одной стереограммы несколькими лицами одновременно. В этом случае стереограмма делается больших размеров или проектируется в виде большего изображения на экран, а каждый из зрителей рассматривает такую стереограмму через свой собственный стереоскоп. Такой способ рассматривания стереоскопических изображений в свое время предлагался для осуществления идеи стереоскопического кино.

Экспериментально пробовали размещать стереоскопическую пару сопряженных киноизображений R и L на экране либо рядом (по горизонтали), как в обычном стереоскопе, либо одно изображение против другого на двух разных, но параллельных друг другу экранах, либо одно изображение над другим по вертикали «столбиком». Для рассматривания спроецированных на экран изображений применялись как преломляющие, так и отражательные зрительные приборы различных конструкций в зависимости от характера размещения пары изображений. Наиболее эффективным оказалось размещение изображений «столбиком», одно над другим. В этом случае для каждого зрителя ракурсы (перспективные искажения) обоих изображений стереопары одинаковы, благодаря чему устраняются затруднения в слиянии обоих сопряженных изображений, что является затруднительным при других размещениях парных изображений. Зрительные приборы — стереоскопы должны устанавливаться стационарно и индивидуально регулироваться в зависимости от положения места в зрительном зале, так как углы, под которыми рассматривается экран, для разных мест зрительного зала различны.

Так как при рассматривании стереоскопических киноизображений, спроецированных на экран, не требуется их дополнительно увеличивать, то оказывается, что в этом случае можно вооружать зрительным прибором только один глаз зрителя, как изображено на рис. 62. Левый глаз зрителя L смотрит непосредственно на левое изображение AB на соответствующей части экрана. Правый глаз R , снабженный отражающей призмой, видит правое изображение A_1B_1 в положении CD , совмещенном с левым изображением AB . Предлагались конструкции «стереочков» и «стереомонокля», отклоняющие оптические оси по вертикали, для рассматривания изображений, спроецированных на экран одно над другим. Такие стереочки изобретатель А. Кауфман предполагал возможным свободно надевать на глаза без прикрепления к креслу. Большим недостатком стереочков и стереомонокля является то, что зритель одновременно видит каждым глазом правое и левое изображения, вследствие чего после слияния пары сопряженных изображений зритель замечает еще и «паразитные» плоские изображения (по бокам от основного стереоскопического изображения).

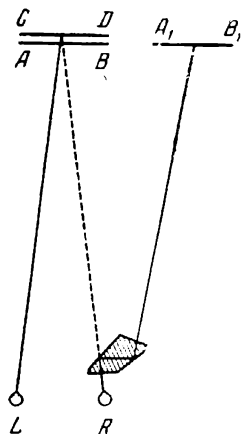


Рис. 62. Стереоскопическая проекция с применением стереомонокля

§ 8. ЭКЛИПСНАЯ СИСТЕМА СЕПАРАЦИИ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

При проекции стереоскопического изображения на экран целесообразно применить вместо стереоскопа другие средства для раздельного наблюдения правым и левым глазом соответственных изображений стерео-

граммы. Одним из таких средств является метод попеременных затемнений, или эклипсная стереопроекция, при которой на экран в быстром чередовании проектируются то правые, то левые изображения стереограммы, а глаза зрителя попеременно затемняются заслонками, прикрывающими экран то от левого, то от правого глаза. При синхронной работе заслонок с чередованием проекции правых и левых изображений правый глаз зрителя будет всегда видеть только правые сопряженные изображения стереограммы, а левый глаз — только левые изображения. При быстром чередовании проекции изображения, видимые правым и левым

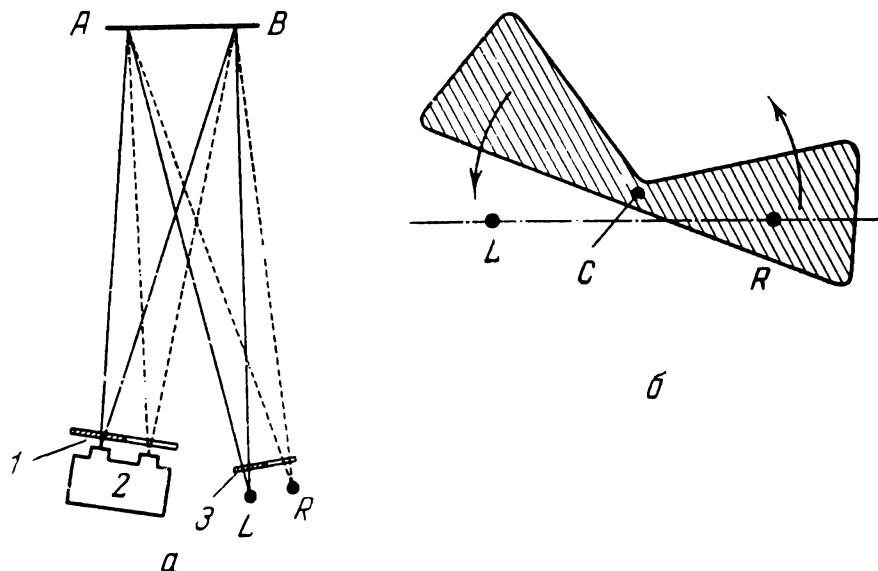


Рис. 63. Схема эклипсной стереопроекции (а) и качающийся obtюратор (б) для рассматривания стереоизображений при эклипсной проекции:

1 — obtюратор; 2 — проектор; 3 — качающаяся заслонка

глазом, удерживаются в памяти вследствие зрительной инерции и сливаются в единое пространственное изображение.

Наиболее просто принцип эклипсного метода осуществляется так: два диапозитивных изображения стереограммы — правое и левое — проектируются специальным проектором, имеющим два объектива, на экран AB (рис. 63, а) так, что изображения на экране налагаются одно на другое. Для сепарации (раздельного рассматривания) изображений перед объективами проектора и перед глазами зрителей устанавливаются подвижные заслонки или вращающиеся obtюраторы. Вращающиеся секторы obtюратора открывают по очереди то один объектив, то другой. Заслонки, установленные перед зрителем, должны синхронно работать с obtюратором, установленным у проектора. В то время, когда на экран проецируется открытым объективом правое изображение, второй объект из прикрыт непрозрачным сектором obtюратора; в это же время перед правым глазом R должно быть открытое окно, а перед левым глазом L — окно должно быть закрыто заслонкой.

При таком положении obtюратора и заслонки зритель увидит правым глазом правое изображение стереопары. В следующий момент времени произойдет перемена положения сектора obtюратора и заслонки, на экран будет проецироваться левое изображение, которое будет видно только для левого глаза зрителя так как непрозрачная заслонка будет находиться перед правым глазом.

Таким образом, для рассматривания стереоскопических изображений зритель должен смотреть на экран через особую, колеблющуюся синхронно с вращением obtюратора заслонку. В то время когда на экран проецируется левое сопряженное изображение, заслонка находится в положении, изображенном на рис. 63 б, открывая левый глаз L ; когда вращающийся зеркальный сегмент в проекторе повернется на 180° и на экран будет проецироваться правое изображение, заслонка должна закрыть левый глаз L и открыть правый R .

При эклипсной системе стереоскопической кинопроекции возможно осуществлять проецирование на экран стереоскопической картины, одним объективом, используя последовательное размещение правого и левого изображения на пленке в чередующемся порядке. При проекции такого фильма на экране будут попеременно видны то правое, то левое изображения стереограммы.

Естественно, что в этом случае скорость проекции фильма должна быть увеличена. Чтобы получить на экране плавное движение воспроизводимых объектов, обычно бывает достаточно скорость съемки 24 кадров в секунду; однако при проекции для получения немерцающего изображения такая частота смены кадров уже будет неудовлетворительна. Чтобы на экране при кинопроекции не было заметно мерцания изображений, число смен света и тени должно быть в секунду не ниже определенного допустимого предела. Критическая частота, при которой пропадает мерцание, т. е. при которой проекция изображений кажется непрерывной, зависит от спектрального состава света и яркости изображения, являясь линейной функцией последней. Критическая частота мерцаний киноизображений на экране может быть определена по следующей формуле:

$$N = 9,61 \xi (\lg E + 2,314).$$

где ξ — коэффициент мерцания, равный 1, — при кажущемся отсутствии мерцания, E — освещенность экрана в люксах.

При обычной освещенности порядка 100 лк эта формула дает частоту мерцаний $N = 9,61 \cdot 4,314 = 41,5$. В кинематографии при проекции фильма, снятого со скоростью 24 кадра в секунду, частота мерцаний составляет 48 периодов в секунду; для этого каждый кадр кинофильма проецируется на экран дважды. При проецировании немых фильмов, снимавшихся со скоростью 16 кадров в секунду, применялся трехлопастный obtюратор, также создававший на экране $3 \times 16 = 48$ мерцаний изображения в секунду. В телевидении частота мерцания яркости экрана составляет 50 периодов в секунду. Очевидно, при последовательной проекции на экран правого и левого изображений каждый глаз зрителя должен видеть частоту смен изображений не ниже критической частоты, а поэтому общая частота смены правых и левых изображений на экране должна составить не менее $2 \times 41,5 = 83$ в секунду. Поэтому при чередующейся проекции правых и левых кадров, размещенных в последовательном порядке на одной киноленте, возникает необходимость увеличения скорости проекции до четырех раз против нормальной.

В одном из способов эклипсной стереопроекции сопряженные изображения стереограммы снимались на две самостоятельные пленки двумя синхронно работавшими киносъёмочными аппаратами. Проецирование производилось двумя кинопроекторами, приводимыми в движение синхронным мотором с попеременной проекцией правого и левого изображения. Заслонки, которые находились перед глазами зрителей, представляли собой obtюраторы с прорезями и приводились в действие также синхронными моторами, делающими то же число оборотов, что и мотор у проектора. В качестве другого зрительного устройства были предложены оригинальные очки с колеблющимися заслонками, представленные на рис. 64.

Принцип действия этих очков следующий. Заслонки 9 и 11 открывают окно 10, в то время как заслонки 16 и 4 закрывают окно 5. Заслонки укреплены на пружинах 6, 14, 7, 2 и приводятся в действие при помощи легких электромагнитов 12, 8, 13, 3, которые соединены с коммутаторами, помещенными на обтюраторе проекционного аппарата. Пружинки действуют так, что при отсутствии тока в электромагните заслонки прикрывают отверстие. Система пружин и заслонок настроена на частоту, близкую к резонансу; поэтому для приведения их в действие требуется незначительное

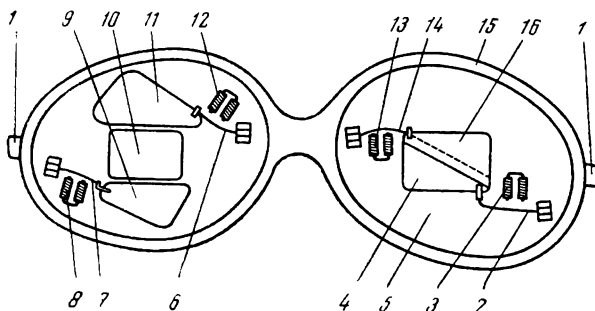


Рис. 64. Эклипсные стереочки

усилие. Вся система монтируется в оправе 1, 1. Габариты таких очков незначительны, а их вес в изготовленной конструкции был доведен всего до 28 г.

Эклипсные системы для стереоскопической кинопроекции с некоторыми видоизменениями конструкции предлагались неоднократно. В частности, подобного типа конструкции разрабатывались С. А. Михайловским, С. С. Брюхоненко и др.

§ 9. ЦВЕТНЫЕ АНАГЛИФЫ

При эклипсном методе сепарации стереоскопических изображений действие мигающих заслонок перед глазами зрителя можно сравнивать с действием фильтров, пропускающих к одному глазу лучи от одного изображения стереограммы и отфильтровывающих лучи другого изображения.

Вместо таких колеблющихся заслонок-фильтров, очевидно, можно было бы применить и другого рода световые фильтры. На применении цветных светофильтров для разделения двух сопряженных изображений стереограммы основывается анаглифический метод воспроизведения стереоскопических изображений.

Впервые метод цветных анаглифов был предложен для проекции диапозитивов. Он заключался в том, что два сопряженных изображения нормальной стереограммы изготавливаются в виде двух диапозитивов, которые одновременно проецируются на экран в совмещенном виде, т. е. наложены друг на друга. Чтобы каждый глаз зрителя видел только одно соответствующее ему изображение стереопары, каждое изображение окрасивается в один из спектральных цветов, например; правое сопряженное изображение — в красный цвет, левое изображение — в зеленый цвет. Перед глазами зрителей помещаются светофильтры, так что правый глаз зрителя смотрит через зеленый светофильтр и видит в основном градации яркости только красного изображения, а левый глаз через красный светофильтр видит только градации яркости зеленого изображения.

Впоследствии аналогичный метод цветной сепарации сопряженных изображений стереопары был применен для рассматривания стереоскопичес-

ких картин, нарисованных или напечатанных цветными красками на бумаге. Анаглифические методы открыли широкие возможности для практического осуществления объемной иллюстрации средствами типографской печати.

Принципиальная схема анаглифического воспроизведения пространственных изображений представлена на рис. 65. Здесь изображены напечатанные на листе бумаги точки a_1, b_1, c_1 , окрашенные в один цвет, например красный, и сопряженные им точки a_2, b_2, c_2 , окрашенные в другой цвет, предположим—зеленый. Если теперь, как показано на схеме, зритель поместит перед глазами такие же цветные светофильтры и будет смотреть на изображенные точки правым глазом R , например, через зеленый светофильтр F_1 , то он увидит на белом листе только красные точки a_1, b_1, c_1 ; они будут казаться ему черными. Зеленые же точки он не увидит, они будут представляться столь же светлыми, как и остальной лист белой бумаги. Точно так же левым глазом L через красный светофильтр зритель увидит на листе бумаги только зеленые точки a_2, b_2, c_2 ; красные точки при наблюдении через красный фильтр будут не отличимы по яркости от чистого поля белой бумаги.

Нетрудно заметить, что если правый глаз R будет видеть точку a_1 в направлении луча Ra_1 , а левый глаз L будет видеть соответственную точку a_2 в направлении луча La_2 , то у зрителя создастся впечатление, что он видит обоими глазами одну и ту же точку, лежащую на пересечении этих визирных лучей в точке I_1 , т. е. перед листом бумаги. Аналогичным образом, наблюдая правым глазом точку b_1 и точку c_1 в направлении лучей Rb_1 и Rc_1 и наблюдая левым глазом соответственные точки b_2 и c_2 в направлении лучей Lb_2 и Lc_2 , зритель получит впечатление о нахождении соответственных точек на пересечении лучей Rb_1 и Lb_2 в точке I_2 , лежащей в плоскости бумаги, и на пересечении лучей Rc_1 и Lc_2 в точке I_3 , находящейся за плоскостью бумаги. Таким образом, у зрителя создается полная иллюзия о пространственной глубине расположения наблюдаемых им точек I_1, I_2 , и I_3 .

Однако если зритель поменяет местами цветные светофильтры, поместив перед правым глазом красный светофильтр, а перед левым глазом зеленый, то он увидит полностью обращенный рельеф наблюдавшейся перед этим анаглифической картины. Теперь зритель правым глазом будет видеть зеленые точки a_2, b_2, c_2 , а левым глазом — красные точки a_1, b_1, c_1 . Пересечение визирных лучей, по которым наблюдаются соответственные точки правым и левым глазом, даст пространственное расположение точек a_1 и a_2 в положении I'_1 (за плоскостью бумаги), расположение точек b_1 и b_2 в положении I'_2 (опять лежащими в плоскости бумаги) и расположение точек c_1 и c_2 в положении I'_3 (перед плоскостью бумаги).

В правильности сделанных здесь замечаний читатель может легко убедиться, рассматривая типичную анаглифическую иллюстрацию, приведенную, например, на листе VIII, держа анаглифические очки сначала так, чтобы красный светофильтр находился перед правым глазом, а затем перевернув очки, чтобы этот светофильтр стал перед левым глазом.

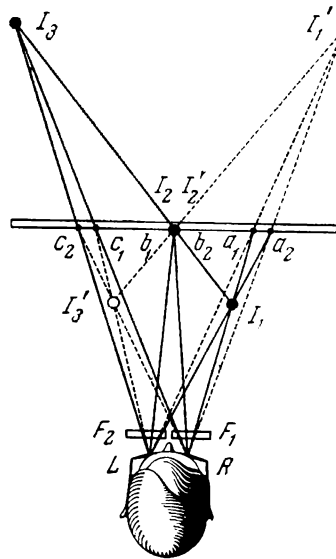


Рис. 65. Принципиальная схема анаглифического воспроизведения

Вместо окрашивания изображений можно при проекции стереоскопических диапозитивов освещать каждое из проецируемых изображений цветофильтрованным светом, устанавливая с этой целью цветные светофильтры либо перед объективами проекционных аппаратов, либо перед диапозитивами, которые в этом случае не подвергаются уже никакой окраске. В этом случае на неосвещенном экране будет видна проецируемая светом точка через тот светофильтр, цветом каких лучей она проектируется. Красное изображение будет видно через красный светофильтр, а зеленое — через зеленый светофильтр.

Аддитивный метод цветных анаглифов. Метод проекции на экран двух сопряженных изображений стереопары цветными лучами и метод окрашивания сопряженных изображений существенно отличаются друг от друга. Первый из них называется аддитивным методом цветных анаглифов, т. е. методом суммирования окрашенных цветовых лучей.

Так как при анаглифическом методе стереопроекции глаза зрителя видят изображения, окрашенные в разные цвета, то очень важно подобрать такие цвета для окрашивания правого и левого изображений, которые бы вызывали одинаковую световую нагрузку, одинаковую яркость обоих изображений и при этом смешении создавали бы нейтральную серую окраску видимого изображения. При аддитивном смешении цветов, когда на экране смешиваются окрашенные лучи, для получения нейтрально серой окраски (от белой до черной) необходимо применять дополнительные цвета.

Удачные цвета для окраски сопряженных изображений в соответственные цвета для светофильтров, помещаемых перед глазами зрителей, были предложены Л. Люмьером, впервые осуществившим по этому принципу стереокино. Он применял окраску одного изображения в желтый цвет, другого изображения — в синий цвет. Рассматривание изображений на экране производилось зрителями через очки, снабженные светофильтрами, также окрашенными один в желтый, другой в синий цвета.

Спектральная пропускная способность этих двух светофильтров делит кривую спектральной чувствительности человеческого глаза между обоими глазами следующим образом: один светофильтр — синий — пропускает область спектра от 400 до 500 *мкм* (область *B*) и от 640 до 700 *мкм* (область *B'*); другой светофильтр — желтый — пропускает область спектра от 550 до 640 *мкм* (область *A*). Цвета светофильтров являются дополнительными друг к другу. Дополнительная зона пропускания синего светофильтра *B'* объясняется необходимостью иметь равномерные световые нагрузки на оба глаза, т. е. сделать сумму площадей $B + B'$ равной площади *A*.

Данные светофильтры дают вполне удовлетворительные результаты для получения нейтральной окраски видимого через эти фильтры изображения и для минимальной утомляемости глаз.

Серьезным недостатком существующих систем анаглифического воспроизведения является органическая невозможность одновременного получения при их помощи стереоскопических и цветных изображений, так как в этих системах элемент цвета используется для сепарации стереоскопических изображений и, следовательно, уже не может использоваться для синтеза цветного изображения. Однако известны некоторые попытки (пока не достигшие цели) совмещения анаглифической системы с получением цветных изображений.

Первая попытка относится к использованию принципа так называемого бинокулярного смещения цветов, который заключается в том, что если один глаз зрителя возбужден каким-либо одним цветом, а другой глаз — другим, то суммарное действие этих возбуждений должно дать психофизиологическое ощущение аддитивной суммы этих цветов. Опыт, однако, показывает, что этот принцип в известной степени верен только

для близких по спектральному составу цветов. При воздействии на глаза сравнительно далеких по спектру лучей никакого аддитивного суммирования цветов не происходит, а ощущается характерный цветной радужный блеск, при котором оказывается попеременно преобладающим то один, то другой смешиваемый цвет. Поэтому попытка изготовить цветной стереоскопический анаглиф, цвета которого создавались бы в результате цветофилтрации очковыми светофильтрами и последующего бинокулярного цветного суммирования, оказалась пока безуспешной.

Вторая попытка получить цветной анаглиф основывается на подыскании для сепарации правого и левого изображений стереопары таких светофильтров, каждый из которых пропускал бы не одну, а две-три спектральные зоны, суммирование которых могло бы быть использовано для окраски каждого из сопряженных изображений. В этом случае каждый светофильтр — и для правого и для левого изображения — должен быть нейтрально серым в результате того, что каждый светофильтр пропускает две-три спектральные зоны, аддитивное суммирование лучей которых дает белый цвет.

Однако кривые пропускания обоих светофильтров должны иметь максимумы и минимумы пропускания, не совпадающие, т. е. кривая одного светофильтра должна иметь максимум пропускания в тех спектральных зонах, в которых кривая пропускания второго светофильтра имеет минимумы, и наоборот. Получение подобных характеристик теоретически возможно, например, при использовании интерференционных светофильтров, однако практически такие светофильтры пока не подобраны.

Субтрактивный метод цветных анаглифов. В основу другого способа анаглифического воспроизведения положен принцип субтрактивного смешения цветов, т. е. вычитания лучей одного цвета светофильтром другого цвета. Этот принцип может быть применен и для проекции стереоскопических изображений на экран. Окрашенные в два цвета диапозитивы стереограммы, наложенные друг на друга, проецируются на экран одним проекционным фонарем. Вследствие этого изображение на экране образуется вычитанием светового пучка вторым окрашенным слоем диапозитива (после прохождения светового пучка через первый слой). Практически применяя этот способ, оба сопряженных изображения можно печатать на двух слоях одной и той же позитивной пленки. Этот способ получил применение для изготовления анаглифических стереоизображений на бумаге и на других непрозрачных подложках, нашедших свое применение для печати объемных книжных иллюстраций. Примером выполнения таких стереоскопических иллюстраций могут служить изображения, приведенные на листах IX-XI. Эти изображения нужно рассматривать через анаглифические очки с расстояния 1,5—2 м.

Анаглифические изображения, сделанные по субтрактивному методу, позволяют осуществлять одновременную проекцию на экран правого и левого изображения стереограммы уже наложенными друг на друга. Это позволяет сделать анаглифический кинофильм, который можно проецировать обычным кинопроектором. Изготовление такого фильма было впервые осуществлено в 1938 г. А. Л. Левинтоном и Е. М. Голдовским. При изготовлении анаглифического фильма оба сопряженных изображения для правого и левого глаза печатались на дипофильме, т. е. на позитивной пленке, имеющей светочувствительную эмульсию на двух сторонах (эта пленка применялась для изготовления цветных картин). Съемка изображений производилась специальной киносъёмочной камерой, снабженной двумя объективами и снимавшей одновременно два изображения на самостоятельные пленки. Изображение, полученное таким образом с одного негатива, печатается на одной стороне дипофильма, а с другого негатива — на другой стороне дипофильма. В процессе дальнейшей обработки дипофильма изображение на одной его стороне окрашивалось протравным

виражем в один цвет, а изображение на другой стороне — в другой цвет. В разработанном способе одно из изображений окрашивалось в красный цвет, другое — в голубовато-зеленый. Приблизительно такие же цвета имели светофильтры для очков.

При субтрактивном методе цветных анаглифов разной степени почернения изображений соответствует различная плотность окраски; светлые же фоны остаются неокрашенными и бесцветными. Каждый очковый фильтр с одной стороны, должен уравнивать цветность одного изображения с фоном, чтобы получить слияние этого изображения с фоном, т. е. «отнять» его от изображения. С другой стороны очковый фильтр должен контрастно выделять другое изображение, окрашенное в противоположный ему цвет, чтобы достигнуть эффекта почернения контуров этого изображения.

§ 10. ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ СЕПАРАЦИИ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

При помощи цветных светофильтров, как мы видели выше, очень удобно создать с л е к т и в н у ю, т. е. избирательную, видимость правым глазом только правого изображения, а левым глазом — только левого изображения стереограммы. Однако в этом случае каждый глаз зрителя видит сопряженные изображения, окрашенные в разные цвета. Такое окрашивание, во-первых, как мы заметили, утомляет зрение и, во-вторых, не позволяет воспроизводить стереоскопическое изображение в естественных цветах.

Сам собой напрашивается вопрос, нельзя ли для разделения лучей при анаглифической проекции воспользоваться такими свойствами света, которые при выделении соответствующей части лучей не придавали бы заметного окрашивания этим лучам. Таким свойством является поляризация света. Лучи плоскополяризованного света обладают свойством свободно проходить через поляризационный фильтр (анализатор), ориентированный в плоскости, параллельной плоскости колебаний в поляризованном луче. Но такие лучи света не проходят через поляризационный фильтр, ориентированный в плоскости, перпендикулярной плоскости поляризации лучей. Возможность получения двух пучков света, поляризованных во взаимно-перпендикулярных плоскостях, позволяет затем их свободно разделять с помощью анализаторов — поляризационных фильтров, ориентированных также перпендикулярно по отношению друг к другу, а следовательно, имеется полная возможность использовать поляризованный свет для сепарации оптически совмещенных изображений стереограммы.

Так же как и при осуществлении цветных анаглифов, при методе разделения сопряженных стереоизображений с помощью поляризованного света можно использовать принцип аддитивной проекции правого и левого изображения и принцип субтрактивной проекции этих изображений. По аналогии с методом сепарации стереоскопических изображений при помощи цветных светофильтров метод сепарации при помощи поляризационных фильтров иногда называют методом поляризационных анаглифов.

Аддитивный метод поляризационной стереоскопической проекции
Наиболее простая стереоскопическая проекция при помощи поляризованного света осуществляется аддитивным методом. Такой метод стереоскопической проекции был предложен в 1891 г. Ж. Андертоном. На рис. 66 представлена принципиальная схема использования явления поляризации света для сепарирования стереоскопических изображений. Правое и левое изображения стереограммы проектируются на экран (недеполяризующий свет) каждое своим проекционным объективом с фильтром, дающим поляризованный цвет. Плоскости поляризации фильтров устанавливаются взаимно-перпендикулярно друг другу. Зрители снабжаются

очками с анализаторами в качестве которых используются поляризационные фильтры в виде пленок.

В качестве отражательных недеполяризующих свет экранов могут применяться различные металлические шероховатые поверхности, а в качестве просвечивающих экранов — недеполяризующие свет стеклянные и пластмассовые матированные листы. Особенно хорошим из отражающих экранов оказались зеркально-растровые поверхности и выполненные из гофрированной алюминиевой фольги. На рис. 67 представлены

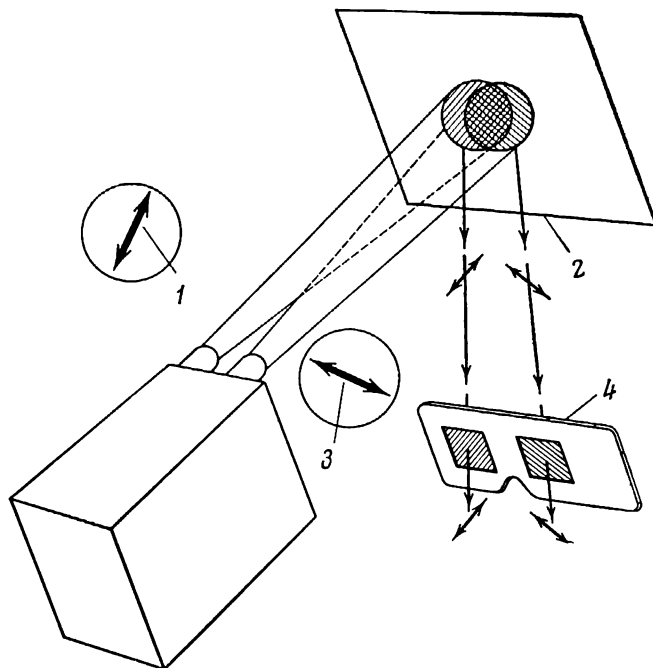


Рис. 66. Схема поляризационной стереопроекции:

1 — ориентация плоскости поляризации левого луча; 2 — экран;
3 — ориентация плоскости поляризации правого луча; 4 — поляроидные очки

светотехнические характеристики двух типов отражательных экранов, применимых для поляризационной стереопроекции: (а) зеркально-растрового экрана (с углом рассеяния $2\alpha = 80^\circ$) и (б) алюминиевого экрана с острой направленностью отражения. Эти экраны дают повышенную яркость изображения по сравнению с обычными диффузно отражающими полотняными экранами в 2—5 раз. Кривые I_0 дают зависимость интенсивности отраженных от экрана лучей для различных углов рассеяния.

Отраженные от металлизированного экрана лучи не изменяют направления плоскости поляризации. Поэтому если зритель смотрит на изображение через поляризационные очки, у которых фильтры установлены так, что перед правым глазом фильтр имеет направление плоскости поляризации, параллельное с плоскостью поляризации лучей правого изображения, а фильтр, помещенный перед левым глазом, имеет направление плоскости поляризации, параллельное с плоскостью поляризации лучей левого изображения, то он увидит правым глазом только соответствующее ему правое сопряженное изображение, а левым глазом — левое изображение. Яркость изображения, видимого на экране через поляризационный фильтр с плоскостью поляризации, параллельной плоскости поляризации проектирующих лучей, характеризуется на рис. 67 кривой I_H , а через фильтр с перпендикулярной плоскостью поляризации — кривой I_D .

В настоящее время для получения поляризованного света и для его анализа почти исключительно применяются искусственные поляризующие свет пленки, называемые поляроидами. Для изготовления первых поляризованных фильтров использовались двулучепреломляющие свойства дихроичного коллоидального соединения иода с хином. Оказалось возможным получить плоские поляризационные фильтры, нанося этот коллоид (геропатит) на прозрачную ацетатную пленку. Такая пленка после соответствующей обработки, ориентирующей в одном направлении оптические оси кристаллов коллоида, действует как поляризатор,

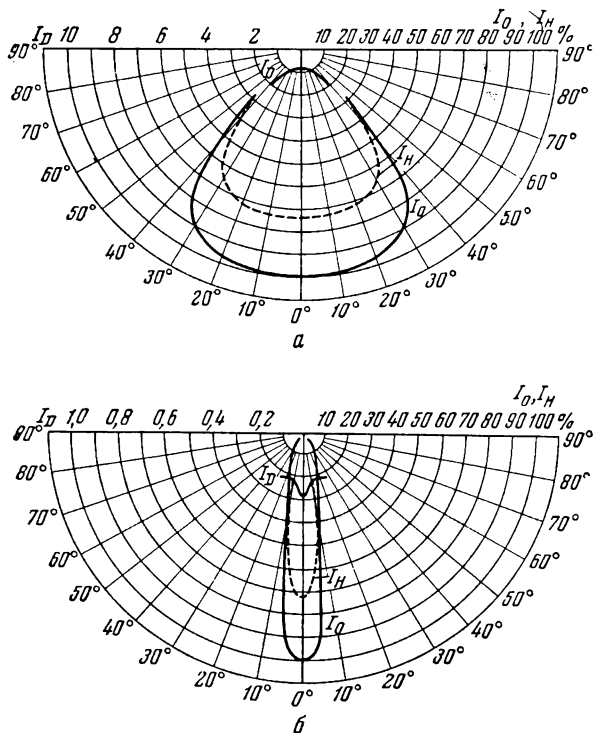


Рис. 67. Светотехнические характеристики экранов для поляризационной стереоскопии

пропуская линейно поляризованный луч. Известен также и ряд других способов изготовления искусственных поляроидов.

Произведенные исследования поляризационных фильтров показывают, что их светопропускающая способность составляет около 30%. Сложенные вместе два поляроидных фильтра при параллельном направлении осей поляризации пропускают до 25% света. Степень поляризации сложенных вместе двух фильтров при перпендикулярном направлении осей поляризации составляет 99,2—99,4%. Спектральная характеристика фильтров такова, что не дает заметной цветной окраски их. Такая характеристика поляризационных фильтров позволяет применять их для проекции и в качестве анализаторов для поляроидных очков, предназначенных разделять стереоскопическую пару изображений.

Субтрактивный метод поляризационных анаглифов. Осуществление субтрактивного метода поляризационных анаглифов оказалось возможным практически реализовать только в самое последнее время при помощи изобретенных Э. Лэндом вектографов.

Вектограф представляет собой фотоматериал, в котором изображение

является само по себе поляризационным фильтром. Оно в различной степени поляризует свет, проходящий через него.

Причины возникновения видимого (оптического) контраста изображения при рассматривании вектографа через поляризационный фильтр графически пояснены на рис. 68. Здесь степень поляризации каждого участка вектографа изображена вектором, указывающим на направление плоскости поляризации и степень его частичной поляризации. На рис. 68, А изображена векторная характеристика поляризационного фильтра —

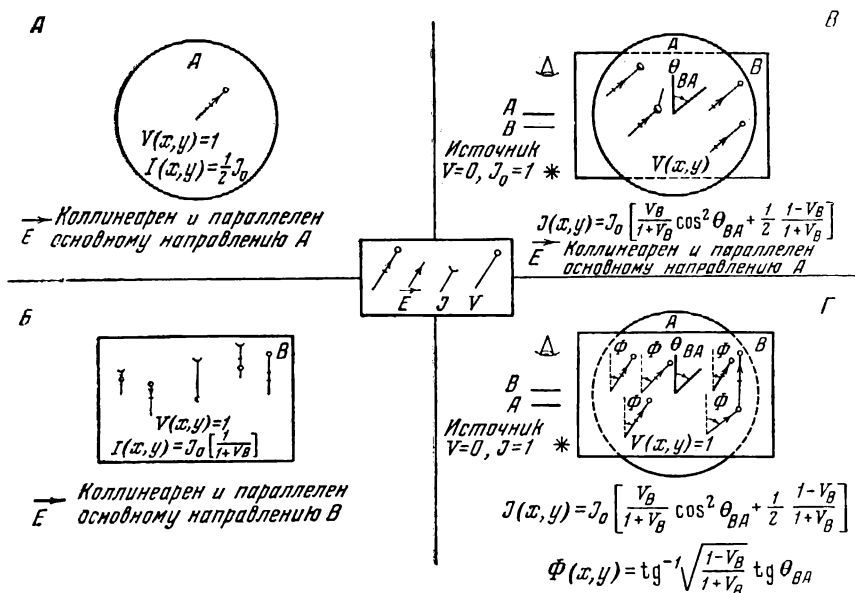


Рис. 68. Выявление оптической плотности изображения вектографа в зависимости от угла поворота плоскости поляризации анализатора

анализатора, на рис. 68, Б — векторная характеристика участка вектографа. На рис. 68, В показан вектограф на фоне поляризационного фильтра А. На рис. 68, Г изображен вектограф, наблюдаемый через поляризационный фильтр на фоне естественного неполяризованного источника света. Во всех этих случаях можно наглядно проследить за изменениями интенсивности света, проходящего через различные участки поверхности вектографа, по величине векторной суммы, получаемой на данном участке от сложения векторов, характеризующих поляризацию данного участка вектографа и поляризационного фильтра, через который рассматривается вектограф.

Интенсивность пропускания участков вектографа с полной поляризацией в зависимости от углов поворота плоскости поляризации анализирующего фильтра в относительной мере представлена на рис. 69.

Для воспроизведения стереоскопических изображений используется комбинация двух одиночных вектографов, называемая обычно **с т е р е о в е к т о г р а ф о м**.

Стереовектограф представляет сложенные вместе два отпечатка стереоскопической пары изображений, выполненных в виде поляроидов с переменной степенью поляризации и ориентированных взаимно-перпендикулярно. Один из отпечатков является правым изображением стереопары, другой — левым изображением. Каждый отпечаток представляет собой искусственный поляризационный светофильтр-поляриод с одинаково ориентированной на всей его поверхности плоскостью поляризации, но обладающий различной степенью поляризации отдельных участков. На

поляризационном отпечатке участки, которые должны воспроизводить темные детали изображения, имеют высокую степень поляризации, а участки, которые должны воспроизводить светлые детали изображения, — малую степень поляризации. Если рассматривать такой поляризационный отпечаток через идеальный светофильтр, то при взаимно-перпендикулярном ориентировании плоскостей поляризации отпечатка и светофильтра участки отпечатка с высокой степенью поляризации представляются темными, так как идущий от них поляризованный свет будет задерживаться светофильтром, а участки с малой степенью поляризации —

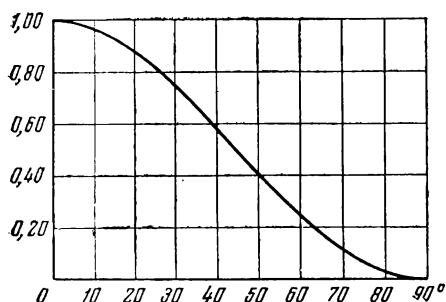


Рис. 69. Интенсивность света после прохождения через два поляризационных фильтра в зависимости от относительного угла поворота их плоскостей поляризации

светлыми, так как идущая от них значительная часть неполяризованного света пройдет через светофильтр с небольшим поглощением. С другой стороны, если рассматривать такой отпечаток через поляризационный светофильтр при взаимно-параллельном ориентировании плоскостей поляризации, то все участки отпечатка и с высокой и с малой степенью поляризации будут представляться одинаково светлыми, поскольку через светофильтр в равной степени будет проходить линейно-поляризованная часть светового потока, проходящего через любые участки отпечатка.

Таким образом, рассматриваемый поляризационный отпечаток при од-

ной ориентации поляризационного светофильтра анализатора представляется равнопрозрачным на всем его поле, а при другой ориентации (повороте светофильтра на 90°) образуется видимая на отпечатке картина с темными деталями изображения на участках, имеющих повышенную степень поляризации.

Сделав два отпечатка правого и левого изображения стереопары в виде двух поляризационных изображений с плоскостями поляризации, ориентированными взаимно-перпендикулярно, очевидно, можно через поляризационный фильтр, ориентированный перпендикулярно плоскости поляризации правого изображения, увидеть это правое изображение и совершенно не замечать левое изображение. Точно так же через поляризационный светофильтр с плоскостью поляризации, повернутой на 90° по отношению к плоскости поляризации первого светофильтра, можно будет видеть только левое изображение и совершенно не замечать правое изображение. Если сложить такие отпечатки, положив их один на другой, то для лучей, проходящих через поляризационный светофильтр, через который видно изображение одного отпечатка, второй отпечаток представится прозрачным, и, наоборот, для лучей, проходящих через другой светофильтр, ориентированный перпендикулярно первому, первый отпечаток представится прозрачным, и через него будут видны только детали второго изображения.

Таким образом, может быть обеспечено раздельное видение правого и левого изображения стереопары соответственно правым и левым глазом если он будет рассматривать сложенные два изображения, представляющих вектограф, через поляризационные очки, плоскости поляризации фильтров в которых ориентированы взаимноперпендикулярно. Каждый отпечаток вектографа является сам частичным анализатором для другого отпечатка и до некоторой степени влияет на видимый контраст в последнем. Если оси поляризации составляют угол 90° , то этот контраст, созданный одним изображением просматриваемым через другое, оказывается меньше контраста, который может быть получен при помощи анализатора, и он не уменьшается при наблюдении через анализатор.

Глава III

РАСТРОВАЯ СЕПАРАЦИЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

§ 1. Растровая автостереоскопия. § 2. Основные свойства регулярно-растровых оптических систем. § 3. Радиально-растровый стереозэкран. § 4. Стереозэкран с многоплоскостным растром. § 5. Ограничения светосилы и сепарирующих свойства растровых стереозэкранов. § 6. Светосильные линзово-растровые стереозэкраны. § 7. Растровые диаскопические стереозэкраны. § 8. Поляризационно-растровый стереозэкран. § 9. Интегральные экраны С. П. Иванова и А. Н. Андриевского. § 10. Оптические системы с многозрачковыми выходами для безочкового наблюдения стереоизображений. § 11. Многостереопарное воспроизведение пространственных изображений. § 12. Проекционное воспроизведение интегральных изображений.

§ 1. РАСТРОВАЯ АВТОСТЕРЕОСКОПИЯ

Растровые оптические системы, появившиеся сравнительно недавно, позволили совершенно по-новому решать техническую задачу воспроизведения стереоскопических и панорамно-интегральных изображений, сделав возможным свободное наблюдение пространственных изображений без очков или каких-либо других индивидуальных зрительных приспособлений многими зрителями одновременно. Такое наблюдение пространственного стереоскопического образа получило название а в т о с т е р е о с к о п и и. При автостереоскопическом воспроизведении изображений зритель как бы автоматически, без видимого зрительного прибора соединяет два сопряженных изображения стереограммы в единый пространственный образ. Однако зрительное приспособление в данном случае не отсутствует совсем, оно только отодвигается от глаз зрителя в непосредственную близость к самой стереограмме. В качестве зрительного приспособления используется р а с т р, т. е. решетка, действующая как оптический инструмент.

При помощи растра-решетки осуществляется загораживание одного изображения стереограммы, например левого, от правого глаза, а другого, правого, изображения — от левого глаза зрителя и в то же время обеспечивается свободное наблюдение только соответствующих каждому глазу изображений. Конечно, для такого загораживания каждое из изображений стереограммы должно само быть разбито на ряд узких полосок, причем полоски правого и левого изображения стереограммы должны последовательно друг с другом чередоваться. Такая стереограмма, составленная из чередующихся полосок правого и левого изображения нормальной стереограммы, обычно называется п а р а л л е л н о - с т е р е о г р а м м о й.

Впервые метод автостереоскопии с использованием растра в виде сетки параллельных линий был предложен взамен обычного стереоскопа для наблюдения бинокулярной стереоскопической картины. В данном случае сетка заменяла собой как бы набор поставленных рядом щелевых стереоскопов, через щель каждого из которых можно наблюдать узенькую полоску стереоскопического изображения, а через все щели представлялась возможность увидеть все изображение, разрезанное на узкие полоски. Позднее метод автостереоскопии был усовершенствован, были

предложены особые автостереоскопические фотопластинки, а затем этот метод был распространен и на стереоскопическую проекцию.

Автостереоскопическая пластинка представляет собой обычную фотографическую пластинку, обратная сторона которой (противоположная эмульсионной стороне) покрыта решеткой черных линий с прозрачными просветами между ними. Применение такой пластинки для получения стереоскопических изображений может быть понято из рассмотрения принципиальной схемы ее действия.

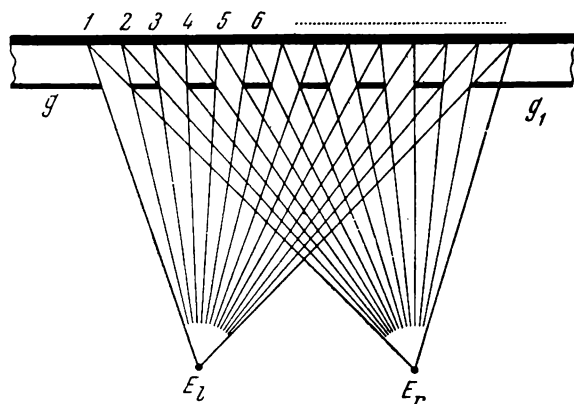


Рис. 70. Автостереоскопическая пластинка

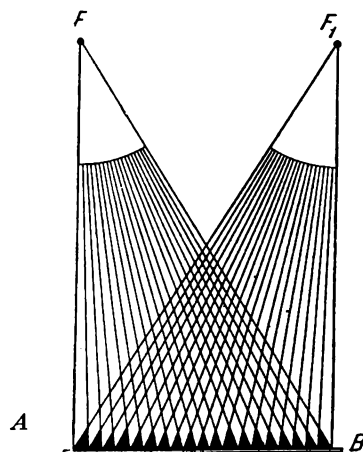


Рис. 71. Получение автостереоскопического изображения по Соколову

Два сопряженных стереоскопических изображения (правое и левое) проектируются на автостереоскопическую пластинку двумя объективами, отстоящими друг от друга на расстоянии нормального стереобазиса, при этом оба изображения накладываются друг на друга. Автостереоскопическая пластинка устанавливается к объективу той стороны, на которой нанесена линейная решетка, вследствие чего изображения экспонируются на светочувствительном слое через решетку.

На рис. 70 изображена в разрезе автостереоскопическая пластинка gg_1 ; точки E_L и E_R соответствуют положению левого и правого объективов. Изображения, снимаемые каждым объективом, разбиваются решеткой на отдельные узенькие вертикальные элементы — полоски. Одна часть элементов изображения задерживается решеткой, а другая часть через щели в решетке попадает на светочувствительный слой пластинки.

На светочувствительном слое пластинки от левого объектива рисуются элементы изображения 1, 3, 5 и т. д., а от правого объектива — 2, 4, 6 и т. д. в промежутках между элементами изображения, рисуемого левым объективом. Таким образом, на светочувствительном слое фиксируются два сопряженных стереоскопических изображения, автоматически разрезанных решеткой на ряд узеньких полосок, причем полоски правого и левого изображений расположены поочередно. Такая картина, нарисованная на светочувствительном слое пластинки, и носит название параллакс-стереограммы.

Автостереоскопическая пластинка после экспонирования подвергается проявлению. В результате получается позитивное изображение параллакс-стереограммы, которое при рассматривании через ту же решетку автостереоскопической пластинки позволяет увидеть объемную картину.

Для наблюдения изображения, полученного на автостереоскопической пластинке, необходимо рассматривать пластинку со стороны решетки на просвет, помещая глаза в то положение относительно пластинки, которое занимали проекционные объективы E_l и E_r во время печати изображения. Левый глаз, помещенный в положении E_l , увидит только элементы изображения, спроектированного левым объективом. Правый глаз, помещенный в положении E_r , увидит только элементы изображения, спроектированного правым объективом.

Так же как в целевом стереоскопе, рассматривание изображения на автостереоскопической пластинке должно производиться из строго определенного положения. В целевом стереоскопе положение глаз фиксируется окулярными отверстиями, при рассматривании же автостереоскопической пластинки наблюдатель сам должен находить наилучшую точку зрения и фиксировать глаза в этом положении.

Принцип автостереоскопии может быть применен для получения объемных изображений, рассматриваемых не только на просвет, но и в отраженных лучах. Один из таких методов получения автостереоскопических снимков предложен в 1908 г. П. П. Соколовым. Метод основывался на применении специальной гофрировки светочувствительной поверхности. Контур такой гофрировки получается путем проекции лучей из двух точек F и F_1 (рис. 71), в которых впоследствии должны находиться глаза зрителя. Эти лучи, пересекаясь вблизи поверхности AB , обозначают ряд зубцов гофра, правый скат которых виден только правым глазом, левый скат — левым. Изготовив, таким образом, гофрированную светочувствительную бумагу и напечатав на правой стороне зубцов правый снимок, а на левой — левый, получим, что при рассматривании такого снимка оба глаза зрителя увидят только свое, предназначенное для этого глаза изображение стереограммы.

Метод автостереоскопической сепарации, предназначавшийся вначале для замены стереоскопа, послужил на базе использования регулярно растровых оптических систем основой для развития более совершенных способов безочкового воспроизведения стереоскопических изображений, наблюдаемых одновременно многими лицами.

§ 2. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА РЕГУЛЯРНО-РАСТРОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Растром, как уже было сказано, называется сетка или решетка с прозрачными и непрозрачными участками, используемая в качестве оптической системы. Растры различаются, с одной стороны, по оптическим свойствам их элементов и, с другой — по форме и рисунку получаемых с их помощью элементов изображения. Растр, элементы которого образуют линию с постоянным периодом (шагом), называется регулярным растром. Именно применение регулярных растров позволяет осуществить стереоскопическую проекцию, одновременно наблюдаемую многими зрителями и создать условия для многократной пространственной сепарации стереоскопических изображений. Наиболее простым типом регулярного растра может служить решетка, составленная из параллельных непрозрачных черных линий с прозрачными участками в виде узких щелей между ними (регулярный параллельный линейный растр). Рассмотрим несколько подробнее общие свойства регулярных растровых систем на примере действия линейного растра.

Параллельный линейный растр. На рис. 72 показан параллельный линейный растр FF , установленным перед плоским экраном EE . Этот растр характеризуется тем, что плоскость XX , проведенная в любом сечении перпендикулярно к направлению линиатуры растра, отсекает совершенно равные отрезки прозрачных участков растра n и равные между собой

отрезки непрозрачных участков раstra m . Шаг растровых линий, или, иначе, период раstra, определяется суммой $n + m = p$. Относительное отверстие растровой решетки определяется отношением

$$\frac{n}{p} = \frac{n}{n+m}.$$

Если в произвольно выбранной точке O перед растром поместить источник света, то свет, прошедший через щели раstra, создаст на экране картину светлых параллельных полос. Положение светлых полос на экране будет определяться как пересечение световых плоскостей с плоскостью экрана. Каждая световая плоскость в свою очередь определяется положением ис-

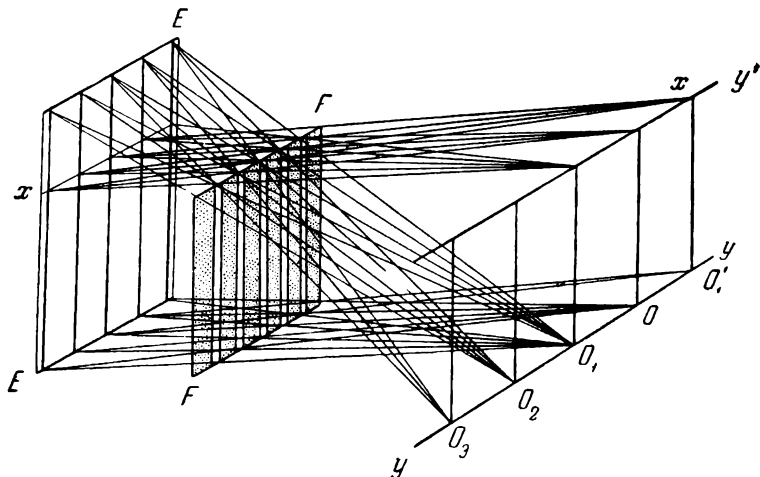


Рис. 72. Оптическая схема действия параллельного раstra

точника света, т. е. точкой O , и прозрачной линией раstra, через которую проходит данная световая плоскость.

Если линии раstra вертикальны, то и все световые плоскости, выходящие из точки O , также будут вертикальными. Так как пересечение двух вертикальных плоскостей дает вертикальную прямую, то, очевидно, световые плоскости, проходящие через все щели раstra, должны пересекаться друг с другом по вертикальной прямой. Поскольку общая точка пересечения всех плоскостей лежит в O , то, следовательно, все световые плоскости будут пересекаться по вертикальной прямой, проходящей через эту точку. Вертикальная прямая, проходящая через точку O , есть геометрическое место пересечения всех световых плоскостей, определяемых положением источника света в точке O . Отсюда вытекает, что любая точка, лежащая на вертикальной прямой, проходящей через точку O , лежит тем самым одновременно во всех световых плоскостях и глаз, помещенный в любую точку этой прямой, увидит через щели раstra все светлые полосы на экране.

Заменяя точечный источник света (который мы предполагали для объяснения картины проекции через растр помещенным в точке O) объективом, проецирующим через этот же растр изображение, мы можем сделать вывод, что изображение на экране, разбитое растром на ряд узких параллельных полосок, сможет полностью быть видно только из точек, лежащих на вертикальной прямой, проходящей через центр объектива.

Вторичные центры схода лучей у линейной растровой системы. Чтобы определить, имеются ли еще точки, лежащие на вертикали, проходящей через центр объектива, из которых также были бы видны все полосовые элементы изображения, разбитого растром, проведем любую плоскость

ХХ через произвольно выбранную горизонтальную прямую $y'y'$, проекция которой в плоскости растра нормальна к направлению линиатуры растра. Плоскость, проходящая через прямую $y'y'$, рассекает растр, экран и вертикальную прямую, проходящую через центр объектива.

На рис. 73 изображена эта плоскость, проходящая через прямую uu со следом пересечения ею экрана EE , раstra FF и вертикальной прямой, проходящей через центр объектива O . На рисунке видно, что светлые полосы на экране будут видны не только из точки O , но через соседние щели раstra также и из точек O_1, O_2 и т. д., лежащих на одной прямой, параллельной плоскости экрана и плоскости раstra.

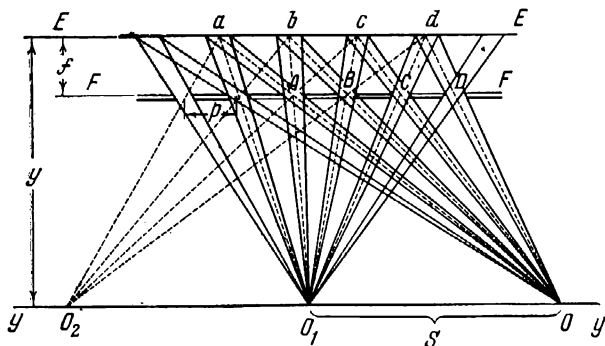


Рис. 73. Ход лучей в плоскости сечения растрового экрана, проходящей перпендикулярно линиям раstra

Для доказательства того, что из точек O_1, O_2 и т. д. действительно можно увидеть все светлые полосы на экране, проведем через середину ряда щелей A, B, C, D лучи из точки O до экрана, которые пересекут его в точках a, b, c, d . Теперь соединим прямыми полученные следы луча на экране с серединами соседних щелей раstra и продолжим эти прямые до пересечения, т. е. проведем прямые между точками c и B , между точками d и C и т. д. и продолжим их до пересечения с прямой OO_1 , параллельной плоскости раstra FF . Предположим, что прямая cB пересечет прямую OO_1 в точке O_1' , а прямая dC — в точке O_1'' . Надо доказать, что точки O_1' и O_1'' совпадают с точкой O_1 .

Рассмотрим треугольники AbB и ObO_1 ; они подобны. Следовательно, можно написать, что их высоты относятся так же, как их основания:

$$\frac{f}{y} = \frac{AB}{OO_1},$$

где f — высота треугольника AbB , y — высота треугольника ObO_1 . Отсюда получаем

$$OO_1 = \frac{y}{f} AB.$$

Из рассмотрения треугольников BcC и OcO'_1 замечаем, что они подобны и что высота треугольника $BcC = f$, а высота треугольника $OcO'_1 = y$. Следовательно, можно написать

$$\frac{f}{y} = \frac{BC}{OO_1'};$$

откуда находим:

$$OO'_1 = \frac{y}{f} BC.$$

Из рассмотрения треугольников DdC и OdO_1'' имеем

$$OO_1'' = \frac{y}{f} DC.$$

Замечая, что $AB = BC = DC = p$ (по условиям регулярности раstra), можно заключить, что

$$OO_1 = OO_1' = OO_1'' = \frac{y}{f} p = S.$$

Таким образом, мы доказали совпадение точек O_1' и O_1'' в точке O_1 , удаленной от точки O на расстояние S . Очевидно, что если бы мы проделали такое же построение не только для двух лучей, но и для большего их числа, то получили бы такие же результаты. Рассматривая ход лучей от светлых полос на экране через более удаленные щели от точки O , увидим, что лучи, проходящие через эти щели, собираются в точках O_1 , O_3 и т. д., лежащих на одной прямой с OO_1 . Удаленность точек O_2 , O_3 , ... от точки O может быть выведена из геометрических соотношений чертежа, приведенного на рис. 73.

Так, из подобия треугольников AcC и OcO_2 получаем, что $O_2O_1 = 2S$. Точно так же получаем $OO_3 = 3S$; $OO_4 = 4S$ и т. д. Следовательно, вторичные точки схода лучей O_1 , O_2 и O_3 и т. д. удалены друг от друга на одинаковые расстояния, равные S .

Пространственная картина схода световых лучей у линейной растровой системы. Переходя от рассмотрения картины образования вторичных точек схода лучей в произвольно выбранной нами плоскости к пространственной картине, мы можем сделать заключение, что если в этой плоскости имеются точки пересечения следов вторичных световых плоскостей изображения, то мы можем такую же картину получить в другой произвольно выбранной нами плоскости, где также должны находиться точки пересечения следов вторичных световых плоскостей. Следовательно, в пространстве имеются прямые, в которых пересекаются вторичные световые плоскости. Эти прямые, во-первых, должны проходить через точки O_1 , O_2 , O_3 , ... и т. д., а во-вторых, должны быть вертикальными, так как вторичные световые плоскости также вертикальны (поскольку они проходят через вертикальные щели раstra).

На основании этих определений можно построить пространственную картину линий пересечения вторичных световых плоскостей. Эти линии, будучи вертикальными прямыми и пересекающими прямую OO_1 , должны все лежать в одной вертикальной плоскости (точнее, в плоскости, параллельной плоскости раstra и плоскости экрана, как изображено на рис. 72). Эти линии представляют собой геометрические места точек, из которых можно видеть через растровые щели все светлые полосы экрана, и поэтому эти фокальные линии называются **линиями избирательного видения**. Плоскость, в которой лежат линии избирательного видения, мы назовем **плоскостью избирательного видения**.

Плоскость избирательного видения для линейного параллельного раstra всегда параллельна плоскости раstra и плоскости экрана; ее положение находится по соотношению

$$\frac{y}{S} = \frac{f}{p}, \quad (1)$$

где y — удаленность плоскости избирательного видения от плоскости экрана; S — шаг (период) линий избирательного видения, т. е. расстояние между их осями; f — удаленность растровой решетки от экрана; p — период линий раstra.

Из этих соотношений вытекает, в частности, то, что при параллельных смещениях растра в своей же плоскости линии избирательного видения остаются неизменно на своих местах. При вращении растра в своей плоскости также вращаются и линии избирательного видения, оставаясь все время параллельными друг другу и линиям растра. Перемещение источника света в плоскости вдоль линий избирательного видения не нарушает их картины; при перемещении же источника света в поперечном направлении линии избирательного видения смещаются, следуя за его движением на величину его поперечного перемещения, но остаются параллельными прежнему своему направлению. При продольном перемещении источника света к экрану или от него плоскость избирательного видения следует за источником света, оставаясь параллельной плоскости растра и экрана. Перемещение экрана в своей плоскости не сказывается на картине линий избирательного видения. Удаление же и приближение экрана к растру вызывает лишь уменьшение и увеличение периода линий избирательного видения, не изменяя их пространственного положения. Наклон экрана и растра, при котором их плоскости остаются параллельными друг другу, вызывает такой же наклон плоскости избирательного видения: последняя занимает положение, параллельное новым положениям плоскостей экрана и растра.

Нарушение условия параллельности плоскостей экрана и растра влечет за собой нарушение условий сходимости вторичных световых плоскостей. Условия сходимости вторичных световых плоскостей при этом не выполняются во всех случаях. В том случае, когда при взаимном наклоне обеих плоскостей нормальная плоскость, проходящая через щели растра, остается нормальной и к плоскости растра и к плоскости экрана (т. е. когда при продолжении обеих плоскостей линия их пересечения оказывается перпендикулярной к направлению линии растра), на экране образуются полосы линейного радиального растра.

Световая характеристика зон избирательного видения. При проекции через щели линейного растра точечный источник света рисует на экране EE (рис. 74) светлые полосы шириной r , период, расстояние между серединами которых равно q . Период светлых полос на экране EE определяется соотношением, выводимым из подобия треугольников ABD_0 и HID_0

$$\frac{p}{q} = \frac{y-f}{y}. \quad (2)$$

Из всех центров D_i пучков лучей светлые полосы на экране видны полностью. По мере удаления от D_i по прямой yy видимость светлых полос r будет уменьшаться, так как будет уменьшаться видимая их ширина; при удалении же от D_i вдоль прямой yy до критической точки K_i светлые полосы совершенно перестанут быть видимыми. При дальнейшем перемещении по прямой yy с некоторой точки опять станут видимыми светлые полосы r , а когда мы дойдем до соседнего центра D_{i-1} или (D_{i+1}) , их видимость станет полной.

Видимая яркость изображения или освещенность с экрана для различных точек прямой yy определяется относительной шириной светлых полос, видимых из данной точки.

Если принять за единицу освещенность экрана данным источником света при условии отсутствия перед экраном растра, то видимая освещенность для точки D будет определена относительной величиной

$$c = \frac{r}{q} = \frac{n}{p}. \quad (3)$$

$$\frac{dc}{dy} = \frac{d\left(\frac{r}{q}\right)}{dy}, \quad (4)$$
$$\frac{dc}{dy} = \frac{1}{q} \frac{dr}{dy}. \quad (5)$$

Обозначая длину основания этих треугольников через a , из треугольника JD_0K можно написать:

$$\frac{\frac{a}{2}}{n} = \frac{y}{f} \quad (6)$$

$$a = \frac{2ny}{f} = 2S \frac{n}{p} \quad (7)$$

108

гор G_0 , то он спроецирует на экран через щели раstra изображение в виде светлых полос r' , расположенных в промежутках между светлыми полосами r , нарисованными проектором D_0 , при этом на прямой yy посередине между точками D_i возникнут новые точки G_i , из которых будет полностью видно изображение, спроецированное на экран вторым проектором G_0 . Относительная яркость изображения на экране для этих точек будет максимальной и равной

$$c = \frac{n}{p}. \quad (8)$$

По мере удаления от точки G_i видимая яркость второго изображения будет уменьшаться, а при некотором удалении от G_i второе изображение совсем перестанет быть видимым. Характер изменения кажущейся освещенности второго изображения для различных точек прямой

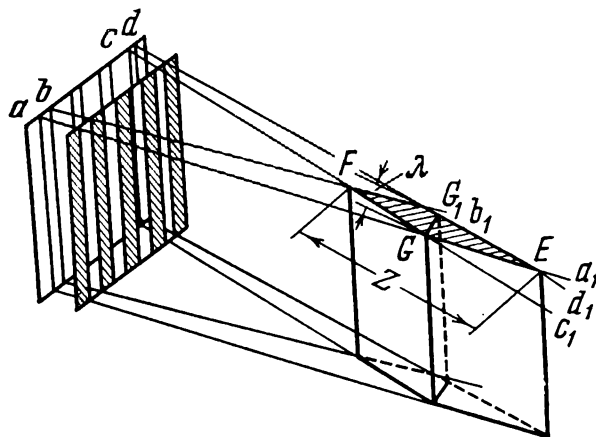


Рис. 75. Пространственная картина образования зоны избирательного видения

yy будет определяться треугольным графиком, который на рисунке показан пунктиром.

Очевидно, глаз наблюдателя, помещенный на оси yy в точке G_i , будет видеть одно изображение, а глаз, помещенный в точке D_i , будет видеть другое изображение. Если на экран проектировать проектором G_0 левое изображение стереопары, а из точки D_0 — правое сопряженное изображение, причем глаза наблюдателя будут помещены на оси yy в центрах пучков лучей (левый глаз в точке D_i , а правый — в точке G_i), то наблюдатель увидит бинокулярно стереоскопическую картину.

Рассматривая на рис. 74 изменение кажущейся освещенности первого и второго изображений вдоль оси yy , можно заметить, что на оси yy имеются зоны b исключительной видимости только правого или только левого изображения и зоны помех t , в которых видны одновременно первое и второе изображения. Легко заметить, что ширина обеих зон вдоль оси yy может быть определена при помощи следующих формул:

$$b = S - a = S \left(1 - 2 \frac{n}{p} \right), \quad (9)$$

$$t = a - \frac{S}{2} = S \left(2 \frac{n}{p} - \frac{1}{2} \right). \quad (10)$$

Допустимая ширина обеих зон b и t , при которых возможно бинокулярное стереоскопическое видение, определяется условием

$$t < B < t + 2b, \quad (11)$$

где B — межзрачковое расстояние глаз наблюдателя. Принимая, как обычно, среднее значение B равным 65 мм, из условия (11) получим, что зона помех t должна быть меньше 65 мм, а сумма $t + 2b$ — больше 65 мм.

Зритель, сидящий таким образом, что его правый глаз находится в зоне видимости правого изображения и левый глаз — в зоне видимости левого изображения, будет наблюдать бинокулярно стереоскопическую картину. При приближении зрителя к экрану от оси yy или при удалении от экрана зона помех возрастает, а зона исключительной видимости становится уже; она представляет в пространстве фигуру в виде ромба (рис. 75).

Наличие вторичных плоскостей избирательного видения. Строя геометрический ход лучей через щели раstra, можно установить наличие вторичных плоскостей избирательного видения стереоскопических изображений. В этих зонах y_1, y_2, \dots, y_n изображение на экране видно не через

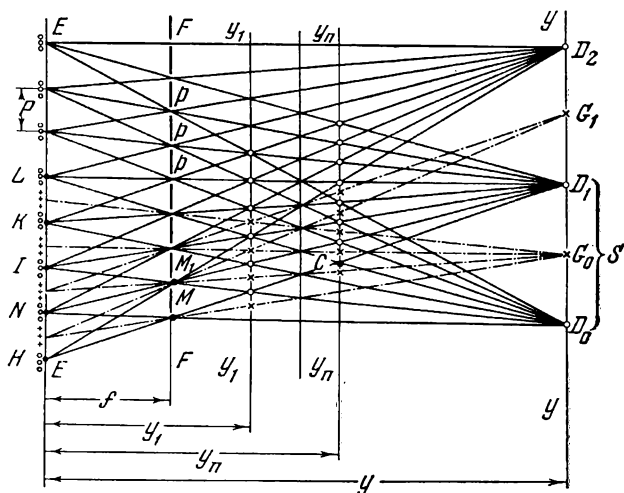


Рис. 76. Образование вторичных зон избирательного видения

все щели раstra, а через одну, через три и т. д. линии раstra, т. е. видимое изображение оказывается состоящим из неполного количества растровых элементов. Положение вторичных плоскостей зон вторичного избирательного видения при наличии двух проекторов в точках D_0G_0 определяются формулой

$$y_n = \frac{2nfy}{y + (2n - 1)f}, \quad (12)$$

где y_n — расстояние от экрана до n -й плоскости избирательного видения (рис. 76); f — расстояние между экраном и растровой решеткой; y — расстояние от экрана до основной плоскости избирательного видения, n — порядковое целое число. Крестики — участки, из которых видны проекторы D ; светлые кружки — участки, из которых видны проекторы G .

Формула (12) выводится следующим образом. Из подобия треугольников HCL и D_0CD_1 (рис. 76) следует, что

$$\frac{HL}{D_0D_1} = \frac{y_n}{y - y_n}, \quad (13)$$

Так как $HL = 2nP$, где $P = HN = IK = KL$ и $D_0D_1 = S$, то равенство (13) можно переписать так:

$$\frac{2nP}{S} = \frac{y_n}{y - y_n}. \quad (14)$$

Далее из подобия треугольников D_0NI и D_0MM_1 получаем, что

$$\frac{P}{p} = \frac{y}{y - f}. \quad (15)$$

Из равенства (14) и (15) вытекает, что

$$\frac{2np}{S} = \frac{y_n(y - f)}{y(y - y_n)}. \quad (16)$$

Наконец, согласно соотношению (1),

$$S = \frac{py}{f},$$

в силу чего равенство (16) принимает следующий вид после некоторых очевидных сокращений:

$$2nf = \frac{y_n(y - f)}{y - y_n}. \quad (17)$$

Определяя из последнего уравнения y_n , мы приходим к формуле (12).

§ 3. РАДИАЛЬНО-РАСТРОВЫЙ СТЕРЕОЭКРАН

Первоначально методы, предлагавшиеся для безочкового рассматривания стереоскопических изображений, основывались на применении для этой цели параллельных растров. Очевидно, что рассматривание стереоскопических изображений на экране с параллельным растром возможно практически только из одного ряда зрительных мест. Второй ряд зрительных мест при параллельно-растровом экране возможен только ниже или выше этой же плоскости, т. е. в другом ярусе. На практике такое многоярусное размещение зрителей, конечно, неудобно и трудно реализуемо. Безочковое наблюдение стереоскопической картины из большого числа рядов оказалось возможным осуществить при помощи экрана с линейным радиальным растром. Именно при помощи такого экрана изобретателю С. П. Иванову удалось впервые показать безочковую демонстрацию стереокинофильмов в большом зале.

Линейный радиальный растр. Этот растр, называемый иначе *перспективным*, представляет собой центральную проекцию регулярного линейного параллельного растра F на плоскость E , пересекающуюся с плоскостью параллельного растра по прямой, перпендикулярной к направлению линиатуры параллельного растра (рис. 77).

Продолжения всех линий радиального растра сходятся в одной общей точке O , носящей название *центра схода растровых полос* или *центра конвергенции растра*. Через этот центр O проходит прямая OF , делящая растр на две симметричные половины, которую мы будем называть *осью симметрии радиального растра* (рис. 78).

Характерной особенностью линейного радиального растра является то, что прямая, проведенная через любую точку растра нормально к оси его симметрии, отсекает равные друг другу по ширине прозрачные n и непрозрачные m участки. Шагом растра, или его периодом, считается расстояние между серединами его двух смежных прозрачных (или непро-

зрачных) линий, равное сумме $n + m = p$. Следовательно, период линейного радиального растра постоянен для любого сечения, нормального к оси симметрии.

Период растра в направлении вдоль оси симметрии изменяется пропорционально удалению от центра конвергенции, т. е. является линейной функцией удаленности от нормали к оси симметрии, проходящей через центр конвергенции. Если на расстоянии h_0 от нормали, проходящей

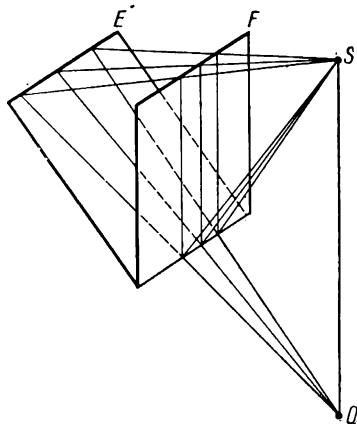


Рис. 77. Построение линейного перспективного радиального растра

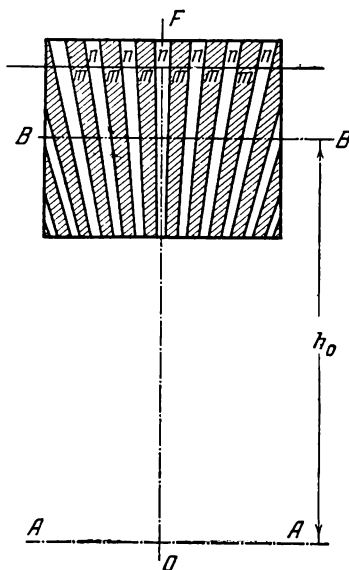


Рис. 78. Щелевой радиальный растр

через центр конвергенции, период растра равен p_0 , то на любом другом расстоянии h период p может быть определен соотношением

$$p = h \frac{p_0}{h_0}, \quad (1)$$

В силу этого изменение периода растра определяется дифференциальным уравнением

$$dp = \frac{p_0}{h_0} dh. \quad (2)$$

Для выполнения условий сходимости всех световых плоскостей, отражаемых от экрана через щели радиального растра, необходимо такое взаимное расположение экрана и растра, при котором их плоскости пересекались бы по прямой, проходящей через центр конвергенции растра и которая являлась бы нормалью к оси симметрии растра. На рис. 79 показано такое взаимное расположение растра F и экрана E , где точка O обозначает центр конвергенции растра, а точка D_0 — центр проекции.

Лучи от точечного источника света D_0 , проходя сквозь щели растра рисуют на плоскости экрана светлые полосы, также радиально направленные и при продолжении сходящиеся в точке O , общей с центром конвергенции растра. Если провести через источник света и щели растра плоскости и продолжить эти плоскости до их пересечения, то, очевидно, они пересекутся по прямой OD_0 , соединяющей центр конвергенции растра с точечным источником света (так как через обе точки проходят, по условию, все проведенные световые плоскости). Прямая OD_0 , является, таким образом, геометрическим местом точек, лежащих во всех проведенных нами плоскостях, а следовательно, глаз, помещенный на этой прямой, будет

одновременно находиться во всех световых плоскостях и видеть сквозь щели раstra все светлые полосы на экране.

Условия сходимости вторичных световых плоскостей для радиального раstra могут быть легко уяснены из рассмотрения следующих геометрических построений. Проводим через точку D_0 , в которой находится точечный источник света, прямую yy , параллельную прямой AA , линии пересечения плоскости раstra F и экрана E , нормальной к оси симметрии раstra. Теперь, проводя любую плоскость X через прямую yy , мы рассечем

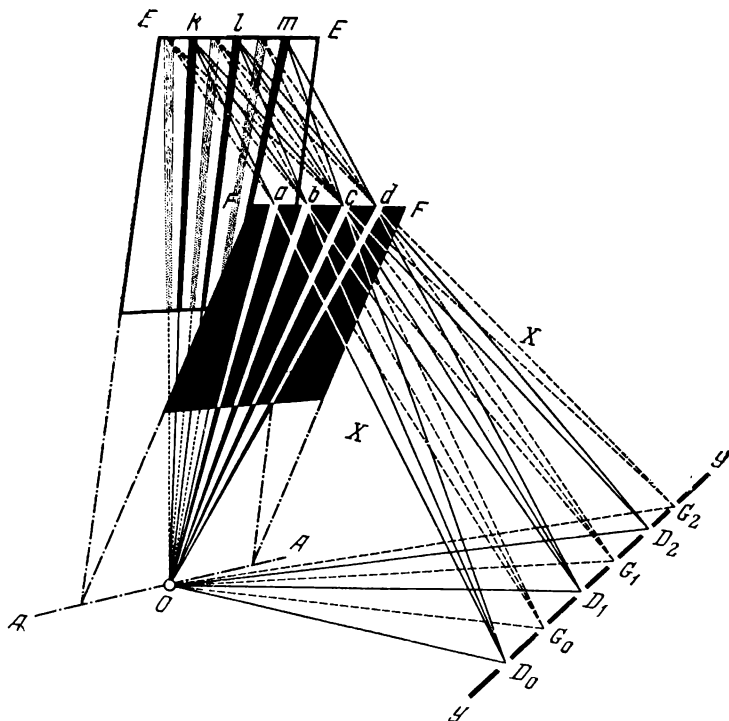


Рис. 79. Оптическая схема действия радиального раstra

этой плоскостью растр FF по нормали к оси его симметрии и экран EE — по прямой, параллельной AA . В плоскости X мы получим следы экрана EE , раstra FF и прямой yy , параллельные друг другу, и следы световых плоскостей, воспроизводящие ту же картину, которую мы имели в плоскости сечения экрана с параллельным растром (рис. 74).

Как и прежде, обозначим через f расстояние между линией EE экрана и линией FF раstra, через y — удаленность экрана от источника света D_0 , через p — период раstra в данном сечении X и через n — ширину щелей раstra. Соединим далее точку D_0 с серединами всех щелей раstra a , b , с прямой D_0a, D_0b, D_0c . Эти прямые встретят след экрана в точках k, l, m . Соединим затем каждую из точек k, l, m всевозможными прямыми с серединами соседних щелей раstra. Эти прямые пересекут прямую yy в точках D_i , центрах световых пучков. Все центры D_i будут, как легко усмотреть из геометрических соотношений, находиться на одинаковом друг от друга расстоянии. Обозначим это расстояние через S .

Из подобия треугольников D_0bD_1 и bkl получаем, что

$$\frac{S}{p} = \frac{y}{f}, \quad (3)$$

т. е. то же соотношение, которое нами было получено для случая проекции через параллельный растр. Соединяя центры световых пучков D_i с центром конвергенции O (рис. 79), можно заметить, что в пространстве через любую прямую OD_i можно провести ряд плоскостей, которые проходили бы через середины щелей растра. Продолжение этих плоскостей до пересечения с плоскостью экрана дает на плоскости экрана следы, совпадающие с серединами светлых полос, нарисованных проекцией точечного источника света через растр. Отсюда можно сделать заключение, что любая из прямых OD_i является геометрическим местом точек пересечения плоскостей, проходящих через середины всех щелей радиального растра и середины светлых полос экрана, полученных проекцией точечного источника света. Следовательно, из любой точки любой прямой OD_i можно видеть сквозь щели радиального растра все светлые полосы на экране. Поэтому прямые OD_i можно назвать линиями избирательного видения для линейного радиального растра. Плоскость, в которой лежат все прямые OD_i , будет плоскостью избирательного видения, она определяется прямой пересечения растра с экраном и точкой D_i .

Собственно стереоскопическую сепарацию сопряженных изображений посредством параллельно-растрового экрана можно рассматривать как частный случай сепарации изображений радиально-растровым экраном. Только в случае параллельного растра центр конвергенции лежит в бесконечности; следствием этого является условие параллельности плоскостей растра, экрана и плоскости избирательного видения (иначе говоря, пересечение их должно лежать в бесконечности). Отсюда вытекает также и условие параллельности друг другу линий избирательного видения.

Основные свойства избирательного действия радиального растра. Перемещение источника света (проектора) означает перемещение точки D_0 и обуславливает связанный с этим поворот плоскости избирательного видения вокруг оси AA на рис. 79 (т. е. вокруг прямой пересечения плоскостей экрана и растра). При этом следует заметить, что радиальное перемещение источника света по прямой от центра конвергенции O не изменяет положения плоскости избирательного видения; перемещение источника света в плоскости избирательного видения параллельно оси AA вызывает сдвиг линий избирательного видения в той же плоскости.

Чтобы получить условия видимости правого и левого изображения в плоскости избирательного видения при радиальном растре, проведем через каждый центр пучка лучей правого изображения D_i серию плоскостей, проходящих через края всех щелей растра. Все эти плоскости будут пересекать экран по границам светлых полос, нарисованных на экране проектором D_0 . Из любой точки каждой прямой OD_i правое изображение, проецируемое проектором D_0 , будет видно с максимальной кажущейся освещенностью, равной, согласно уравнению (8), § 2

$$c = \frac{n}{p}.$$

Аналогичным построением могут быть получены прямые OG_i , из которых будет видно левое изображение, проецируемое на экран проектором G_0 , причем кажущаяся освещенность его также будет равна $c = \frac{n}{p}$. Все прямые OD_i и OG_i расположены в плоскости, проходящей через объективы проектором D_0 и G_0 и через прямую пересечения плоскостей экрана и растра. Именно в этой плоскости должны находиться глаза зрителей, чтобы видеть стереоскопическую картину. В этой плоскости вокруг каждой прямой OG_i и OD_i простираются зоны видения левого и правого изображений, в которых освещенность будет линейно убывать по мере удаления от прямой OG_i и OD_i от максимума до нуля. Каждая зона видения в плоскости избирательного видения будет огра-

ничена прямыми, соединяющими точку O с краями основания a зоны видения G_i или D_i , изображенной на рис. 74. Чтобы зритель видел правым глазом правое, а левым глазом — левое сопряженные изображения стереограммы, необходимо каждому зрителю занимать перед экраном строго определенное положение. При отклонении головы из правильного положения вбок правый глаз зрителя неизбежно попадает в зону видения левого изображения, и зритель увидит инвертное стереоскопическое изображение (так называемое псевдоскопическое).

Колебательные движения и вращение радиального растра. Как было установлено выше, в случае применения параллельного растра перемещение его вдоль плоскости в любых направлениях без вращения линиатуры не нарушает расположения линий избирательного видения. При этом было выяснено, что положение в пространстве зон избирательного видения не изменяется в случае параллельных смещений растра, так как положение этих зон определяется только периодом растра, расстоянием между растром и экраном и удаленностью от экрана источника света, а эти величины в данном случае остаются постоянными.

Для радиального растра расположение линий избирательного видения в плоскости избирательного видения определяется линейными соотношениями между удаленностью растра от экрана, удаленностью источника света от экрана и периодом растра в сечениях, нормальных к плоскостям растра и экрана, а положение плоскости избирательного видения определяется прямой пересечения плоскостей растра и экрана и положением в пространстве источника света. Эта прямая, очевидно, должна лежать в плоскости растра и быть нормальной к оси симметрии его. Если ось симметрии растра вертикальна, то прямая пересечения растра с экраном будет иметь горизонтальное направление. Следовательно, плоскость с линиями избирательного видения, проходя через эту прямую пересечения, будет отличаться тем, что нормали, проведенные в этой плоскости к осевой линии избирательного видения (являющейся осью симметрии зоны избирательного видения), будут все параллельны прямой пересечения растра с экраном, т. е. будут горизонтальны.

Вращая радиальный растр на небольшой угол вокруг центра конвергенции растровых полос, мы будем создавать соответствующее вращение линии пересечения растра с экраном и соответственно этому вращение плоскости избирательного видения вокруг ее осевой линии OD . Небольшие колебательные движения радиального растра могут быть допущены без практической заметного ухудшения разделения стереоскопических изображений, наблюдаемых с неподвижных точек зрения. Колебательные движения растра возможны как вращательного характера, вокруг центра конвергенции растровых полос в плоскости самого растра, так и характера возвратно-поступательных колебаний в плоскости растра вдоль прямой пересечения плоскостей растра и экрана.

Вращательные движения растра, как мы уже заметили, создают качания плоскости избирательного видения вокруг прямой, проходящей через центр конвергенции растровых полос и центр проекции (светящаяся точка), создающий данное поле линий избирательного видения. Возвратно-поступательные движения растра вдоль прямой пересечения растра с экраном приводят к вращательным колебаниям линий избирательного видения в их общей плоскости вокруг точек, лежащих на этих линиях на расстоянии, равноудаленном с центром проекции от прямой пересечения растра с экраном.

Если представить себе плоскость, параллельную плоскости растра и проходящую через центры объективов D_0 и G_0 , проецирующих на экран соответственно правое и левое изображения (рис. 79), то при повороте растра на угол φ плоскость избирательного видения повернется тоже на угол φ . При этом для линий избирательного видения левого изображения

плоскость избирательного видения повернется вокруг центра объектива G_0 , создающего эти линии, а для линий избирательного видения правого изображения — вокруг центра правого объектива D_0 . В результате плоскость избирательного видения левых изображений будет проходить через прямую $y'y'$, а правых изображений — через другую прямую — $y''y''$.

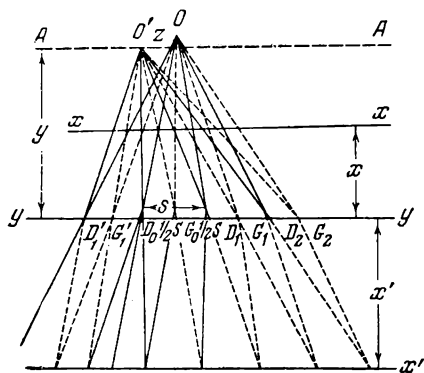


Рис. 80. Смещение линий избирательного видения правого и левого изображений при колебательном движении раstra

При возвратно-поступательных движениях раstra по прямой пересечения его с экраном центра конвергенции раstra O будет перемещаться в новое положение O' , как это представлено на рис. 80. Вследствие этого все линии избирательного видения соответственно повернутся вокруг точек, лежащих на прямой yy , на которой находятся проекционные объективы D_0 и G_0 . Как видно из рис. 80, при сдвиге раstra на величину z линии избирательного видения в области между прямыми yy и xx для правого и левого изображения остаются разделенными, а дальше в области между прямыми xx и AA линии избирательного видения правого и левого изображения при колебаниях раstra перекрывают одна другую, а следовательно, в этой зоне сепарация правого и левого изображения нарушается.

Протяженность зоны сепарации между прямыми yy и xx определяется (при условии удаления проекторов друг от друга на расстояние, равное половине периода между линиями избирательного видения, образованными одним источником света на оси yy) следующим соотношением:

$$x = \frac{yS}{S + 2z}. \quad (4)$$

Здесь S — период линий избирательного видения от одного источника света на оси yy , удаленной от прямой пересечения раstra с экраном AA на расстояние y ; z — линейная величина амплитуды качания раstra (т. е. расстояние от одного крайнего положения O' центра конвергенции раstra до другого его крайнего положения O).

Очевидно, при удалении от экрана на прямую yy в пространстве до оси $x'x'$ зоны избирательного видения, образованные правым и левым проектором, также не будут налагаться друг на друга при качаниях раstra. Протяженность этого пространства между линиями yy и $x'x'$, в котором возможна сепарация изображений, рисуемых правым проектором, определяется соотношением

$$x' = \frac{Sy}{2z - S}. \quad (5)$$

Если

$$2z = S,$$

т. е.

$$z = \frac{1}{2} S,$$

то

$$x' = \infty \quad (6)$$

Это показывает, что при качании растра, равном половине периода следования линий избирательного видения на оси yy , наложения линий правого и левого изображений за прямой yy не произойдет. Отрицательная величина x' , получаемая из равенства (5) при значениях $z < \frac{1}{2}S$, выражает в этом случае отсутствие возможности наложения правых и левых зон избирательного видения одной на другую.

Практически колебательное движение растра может быть использовано для устранения видности грубой структуры растра в тех случаях, когда приходится наблюдать изображение через крупный растр, и для уширения зон избирательного видения вблизи экрана. Колебательное движение растров приводит к образованию на изображении неких линий, которые придают ему «струйчатый» вид. Линии соответствуют положению светлых полос растра в моменты концов хода, так как в такие моменты скорость смещения лучей становится нулевой. Чтобы сделать струйчатость невидимой, необходимо, чтобы растры имели достаточно большое количество полос. Если амплитуда качания полос растра будет равна 0,5 шага светлых полос растра, то между линиями, образованными в одном конце хода растра, поместятся линии, образованные в другом конце хода, что создаст фон непрерывного сплошного вида. Вместо колебательного и возвратно-поступательного движения при относительно малой ширине растрового экрана допустимо непрерывное вращение радиального растра вокруг центра конвергенции его полос. Чтобы при вращении растра сохранялась симметрия полос, получающихся на экране, шаг растровых полос должен быть в этом случае постоянным для всех участков растра, находящихся на одном и том же расстоянии от его центра конвергенции; этому условию удовлетворяет радиальный растр с постоянным угловым периодом.

§ 4. СТЕРЕОЭКРАН С МНОГОПЛОСКОСТНЫМ РАСТРОМ

Как нами было выяснено выше, линейный растр создает в плоскости избирательного видения концентрацию света вдоль осевых линий избирательного видения, спадающую по линейному закону, изображаемому треугольным графиком. Такое распределение света в плоскости избирательного видения происходит при освещении растра точечным источником света и при достаточно крупных элементах растра. Неточечный источник света, а также влияние дифракции при прохождении света, отраженного экраном, через щели растра размывает картину светораспределения. Действительная картина светораспределения в плоскости избирательного видения определяется кривыми, близкими к синусоидам, огибающим площадь, равновеликую треугольникам. При этом максимальная интенсивность светового потока в осевых линиях несколько уменьшается вследствие расширения зон концентрации света.

Такое распределение света в плоскости избирательного видения имеет свои достоинства; наблюдаемая яркость изображения уменьшается незначительно при небольших вынужденных отклонениях глаза от осевой линии избирательного видения. Для еще более устойчивого поддержания постоянной величины яркости видимого изображения в зонах, близких к осевым линиям избирательного видения, можно применить многоплоскостной растр. В случае применения такого растра максимальное значение интенсивности света, сконцентрированного вдоль осевых линий избирательного видения, оказывается наибольшим, и это значение сохраняется в зонах, близких к осевым линиям, даже при крупной структуре растровых полос.

Типичным представителем такого многоплоскостного растра является трехплоскостной радиальный растр, предположенный Е. Ноайоном для

устройства качающегося радиально-растрового стереоэкрана. Этот растр, состоящий из трех плоских растровых фильтров с линиатурой, радиально исходящей из общего центра, лежащего на общей прямой пересечения всех трех растров и экрана, дает распределение света в плоскости избирательного видения по трапецидальному закону.

Вертикальный разрез стереоэкрана с тремя растровыми фильтрами представлен на рис. 81. На чертеже прямая OE является следом плоскости экрана, прямая OF_1 — следом плоскости основного раstra F_1F_1 . Прямые $OF_{1/2}$ и OF_2 — следы дополнительных растровых фильтров $F_{1/2}F_{1/2}$ и F_2F_2 , установленных первый ближе к экрану, второй дальше от экрана, чем

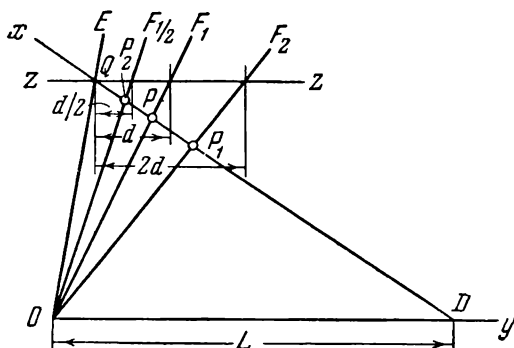


Рис. 81. Вертикальный разрез стереоэкрана с тремя растровыми фильтрами

основной фильтр. Прямая Oy — след плоскости избирательного видения, прямая Dx — след плоскости, нормальной к плоскости чертежа и проходящей через источник света, проектирующий изображение на экран, т. е. через объектив проектора D .

Плоскость Dx представлена на рис. 82. Эта плоскость пересекается с плоскостью раstra F_1 по прямой, нормальной к плоскости чертежа, данного на рис. 81, на котором след этой прямой изображен точкой P . Точно так же эта плоскость пересекает растры $F_{1/2}$ и F_2 и экран E по прямым, нормальным к плоскости чертежа, следом которых являются соответственно точки P_2 , P_1 и Q на рис. 81.

Условием постоянства линейного периода радиального раstra служит равенство периодов следования элементов раstra вдоль любой прямой параллельной линии пересечения данного раstra с экраном. Следовательно, плоскость Dx , пересекающая все три раstra по прямым, параллельным прямой пересечения этих растров с экраном (следом этого пересечения на рис. 81 является точка O), должна отсекал равные отрезки на осях P , P_1 и P_2 .

Обозначим длину равных отрезков, отсекаемых центрами щелей раstra на оси P (вдоль F_1F_1 на рис. 82), величиной r . Заметив, что длина отрезков, отсекаемых на оси Q серединами теневых полос от раstra F_1 , на экране EE постоянна, обозначим ее величиной q . Серия плоскостей, проходящих через середину одной и той же щели раstra F_1F_1 и через концы различных отрезков q , отложит на оси yy равные отрезки s .

Если угол между плоскостями Dx и Oy (рис. 81) увеличить, то отрезки r и q также увеличатся, а отрезки s останутся постоянной величины. Проведем через ось Q плоскость Z , параллельную плоскости Oy . В любой плоскости, проходящей через ось Q , середины теневых полос, рисуемых на экране, и середины растровых полос разных фильтров окажутся на общих прямых. Поскольку эти прямые лежат в плоскости Z , параллель-

их точка пересечения P' находится в плоскости раstra F_1 , где мы проведем прямую F_1F_1 , являющуюся следом пересечения плоскости раstra F_1 с плоскостью Dx . На EE отметим точку Q_2 так, что $QQ_2 = 2q$ и проведем Q_2S , которая встретит QS' в A' ; прямая F_2F_2 , проходящая через A' , будет пересечением раstra F_2 с плоскостью Dx . На EE отметим точку $Q_{1/2}$ так, что $QQ_{1/2} = \frac{q}{2}$ и проведем $Q_{1/2}S$, которая встречается QS' в B' . Прямая $F_{1/2}F_{1/2}$, проходящая через B' , будет пересечением раstra $F_{1/2}$ с плоскостью Dx .

Пересечения прямых SQ и SQ' следами плоскостей $F_1, F_2, F_{1/2}$ находятся на средних линиях двух последовательных полос раstra. Период растровых полос PP' будет для раstra F_1, AA' — для раstra F_2 и BB' — для раstra $F_{1/2}$.

Для раstra $F_{1/2}$ вставим между полосами B широкие полосы B' , расположенные посередине щелей BB . Пусть K_1 является относительной величиной ширины их щелей для раstra F_1, K_2 — для раstra $F_2, K_{1/2}$ — для полос B раstra $F_{1/2}, K'_{1/2}$ — для полос B' раstra $F_{1/2}$. Пусть i будет отношением расстояния между двумя объективами D и G к шагу s линий видения на оси yy .

Объективы будут помещены симметрично относительно точки S (точка, находящаяся на пересечении плоскостей, содержащих середины полос растров F_1 и F_2 и середины прямых полос раstra $F_{1/2}$). Для конструктивного выполнения трехплоскостного раstra Ноайон рекомендует принять $K_1 = 0,275, K_2 = 0,45, K_{1/2} = 0,1, K'_{1/2} = 0,215, i = 0,2$.

Чтобы построить графики освещенности в зонах видения, мы поступим таким образом. На EE отметим жирной чертой с крестами все те участки, откуда можно увидеть проектор D (см. рис. 82), жирной чертой с кружками пометим участки, откуда виден проектор G (эти участки представляют светлые полосы экрана). На оси yy отметим области, откуда можно видеть светлые полосы, находящиеся между Q и Q' . Чтобы проследить график освещенности правых и левых изображений, отложим в качестве ординаты в каждой точке оси yy общую длину участков освещенных полос, которую можно из этой точки видеть на экране. Относительная величина освещенности в каждой точке будет равна длине ординаты, разделенной на q . График освещенности правого изображения, создаваемая проектором D , нанесена сплошными линиями, график освещенности левого изображения, создаваемого проектором G , — прерывистыми линиями. Такие графики действительны для всех областей плоскости избирательного видения. На оси, проведенной в этой плоскости, расположенной на расстоянии x от O , абсциссы графика должны будут оказаться уменьшенными в соотношении $\frac{x}{L}$, ординаты же останутся постоянными. Схемы повторяются на оси y , следуя периоду длины $2s$. Они несколько различаются для двух последовательных линий видения. Можно различить линии видения OS , соответствующие узким полосам раstra $F_{1/2}$, и линии видения OS' , соответствующие широким полосам раstra $F_{1/2}$. На участке S вдоль оси yy имеется зона помех шириной t с границей в двух зонах b избирательного видения. В S' зона помех ограничена зонами исключительного видения b' .

Величины t, b , и b' определяются следующими соотношениями

$$t = \frac{S}{2} \left(1 - \frac{i}{2} K'_{1/2} - K_2 \right), \quad (1)$$

$$2b + t = 2S (K_{1/2} + K_1 - i), \quad (2)$$

$$2b' + t = 2S (K'_{1/2} + K_1 - i). \quad (3)$$

§ 5. ОГРАНИЧЕНИЯ СВОЕОСИЛЫ И СЕПАРИРУЮЩИХ СВОЕОСТВ РАСТРОВЫХ СТЕРЕОЭКРАНОВ

При проекции на стереоскрин со щелевым растром только часть лучей проходит через щели, значительная же часть света задерживается непрозрачными элементами раstra. Поэтому даже наибольшая яркость изображения, наблюдаемого из осевых линий избирательного видения, оказывается значительно меньше яркости того же изображения, спроектированного на обычный, ничем не загороженный экран.

Так, например, если линейный щелевой растр стереоскрина имеет относительное отверстие 1 : 3, т. е. если ширина щелей у него в три раза меньше падающего растровых полос, то такой растр будет пропускать на экран только $\frac{1}{3}$ светового потока, освещающего растровый экран. Лучи, отраженные экраном обратно, должны вторично пройти через растр, и, следовательно, часть их опять будет задержана растром. Количество света, прошедшего обратно через растр, уже составит только $\frac{1}{9}$ часть от полного светового потока, освещавшего стереоскрин. Максимальная яркость изображения, наблюдаемого из осевых линий избирательного видения, в этом случае составит $\frac{1}{3}$ от яркости изображения при прямой проекции на экран, не загороженный растром.

Таким образом, можно заметить, что максимальная яркость изображения, наблюдаемого на щелевом растровом стереоскрине, прямо пропорциональна относительному отверстию элементов раstra, а общее количество света, отраженного таким экраном обратно в зрительный зал, пропорционально квадрату относительного отверстия его элементов. Очевидно, при уменьшении относительной ширины щелей у стереоскрина с щелевым растром одновременно с уменьшением яркости наблюдаемого изображения происходит также уменьшение рассеяния света между осевыми линиями избирательного видения. Зоны избирательного видения становятся более узкими.

При достаточно малой ширине щелей раstra и при значительном удалении отражающей плоскости экрана от раstra прямая пропорциональность между яркостью наблюдаемого изображения и относительной шириной щелей раstra перестает соблюдаться. Эта зависимость нарушается вследствие дифракционных явлений, происходящих при прохождении света через растр.

Рассмотрим несколько подробнее происходящие изменения яркости наблюдаемой картины за счет дифракционной фокусировки изображения растровых полос на экране.

Изменение светосилы стереоскрина со щелевым растром при дифракционной фокусировке растровых полос на экране. Дифракционные явления при прохождении света через щели раstra выражаются в следующем. При освещении тонкой щели точечным источником света за ней на экране образуется светлое изображение этой щели. Яркость этого изображения неодинакова по ширине. Как показывает теория, дифракция зависит от соотношения следующих величин: расстояния источника света от щели, расстояния щели от экрана и ширины самой щели. При известной удаленности экрана от щели происходит концентрация света вдоль осевой линии изображения щели: лучи света как бы фокусируются вдоль этой линии. При других расстояниях экрана от щели, наоборот, в центре светлого изображения получается потемнение.

Если обозначить расстояние источника света от щели через x , расстояние щели от экрана — через s и половины ширины щели — через y , то расстояние между щелью и экраном, при котором центральная полоска окажется яркой или темной, может быть определено следующей формулой:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{s} = \frac{4n - 1}{4} \cdot \frac{\lambda}{y^2}. \quad (1)$$

Здесь n — целое число; λ — длина волны света, освещающего щель. При n нечетном в центре изображения имеется максимум освещенности, при n четном — минимум освещенности. Наибольшая концентрация света вдоль оси светлой полосы получается, когда щель заполнена первой «зоной Френеля», что соответствует значению $n = 1$.

Вычисление показывает, что для того, чтобы можно было наблюдать на экране род фокуса от щелей раstra, нужно иметь отношение y/c достаточно малым. Так, при $c = 20$ см и $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-3}$ мм фокусирование лучей будет наблюдаться для щелей раstra, имеющих ширину $2y = 0,55$ мм.

Изображение светлой полосы от щели на достаточно удаленном экране имеет размытый вид. По мере приближения экрана к щели концентрация света делается сперва более определенной, затем центр начинает темнеть и получается темная полоса (действуют две первые зоны Френеля); при дальнейшем приближении экрана темная осевая полоса расширяется и сам центр ее снова делается светлым. Очевидно, наиболее выгодным расположением отражательной поверхности стереоэкрана от щелевого раstra с точки зрения концентрации света вдоль осевых линий светлых полос было бы такое, при котором щели раstra заключали бы как раз первую зону Френеля. В этом случае щели раstra производят фокусирование, подобное фокусированию лучей линзами.

В стереоэкране, использующем щелевой линейный растр, расстояние между растром и отражательной поверхностью экрана в сотню раз больше ширины щелей раstra. Поэтому на характере теневой картины, получаемой от решетки на экране, в значительной степени сказываются дифракционные явления. Неправильно выбранные соотношения между шириной щелей раstra и расстоянием раstra от экрана могут приводить к расфокусированию лучей на экране, в результате которого в середине светлых полос, рисуемых на экране, вместо концентрации света появляются темные участки.

Усиление яркости изображения, наблюдаемого на стереоэкране при условии дифракционного фокусирования светлых полос от щелей, может иметь несомненно некоторое значение. Однако в практическом смысле значительно больших результатов в отношении увеличения светосильности растрового экрана можно получить, если фокусировку изображения полос на экране осуществлять не путем использования дифракции на щелях раstra, а путем фокусирования лучей линзовыми элементами, заменяющими простые щели раstra. Растр, у которого щели заменены линзовыми элементами, могущими фокусировать проходящие через них лучи на отражательной плоскости экрана, позволяет создать наиболее светосильный стереоэкран, увеличивающий яркость наблюдаемой картины во много раз по сравнению с тем, что дает простой стереоэкран с щелевым растром.

Ограничения сенарирующих свойств растровых стереоэкранов. Четкость разделения зон избирательного видения в пространстве перед растровым экраном определяет собой качество сепарации видимых зрителем на экране изображений стереограммы. Наибольшая чистота сепарации изображений, наблюдаемых правым и левым глазом зрителя, будет достигнута, когда будет исключена возможность просмотра наряду с основным изображением также и несоответственного изображения стереограммы, например для правого глаза — левого изображения, и наоборот.

Количественно чистоту сепарации, даваемую стереоэкраном, предложено С. М. Проворновым оценивать коэффициентом, изменяющимся от 0 (для диффузно-отражающего экрана) до 1 (для идеально сепарирующего стереоэкрана). Этот коэффициент можно определить как отношение $k = \frac{2I_1 - I}{I}$, где I_1 — наблюдаемая яркость одного из сопряженных изображений, спроектированных на экран, а I — общая наблюдаемая

яркость экрана и при проекции на него двух сопряженных стереоизображений.

Наибольшую четкость разделения изображений дают линзово-растровые стереоэкраны, меньшую четкость — экраны со щелевыми растрами. Для линейных растров разделение наблюдаемых изображений обеспечивается только в одной плоскости, для растровых систем с сотовой структурой (например, для стереоэкрана ангармонического класса) возможно пространственное разделение зон избирательного видения, расположенных в разных плоскостях. В линейных растровых экранах пространственное раздельного наблюдения повторяемых растром изображений ограничено определенной полезной глубиной пространства и допустимыми отклонениями точек наблюдения по нормали от плоскости избирательного видения. Значительными помехами для раздельного наблюдения пространственных изображений являются паразитные рефлексы от поверхности самих растровых элементов.

Для выяснения причин, ограничивающих частоту сепарации стереоскопических изображений при безочковой проекции на растровых экранах, рассмотрим ограничения областей сепарирования зон избирательного видения в пространстве перед растром для линейных растровых систем. В качестве примера возьмем проекцию двух стереоизображений на радиально-растровый стереоэкран. Полученные нами выводы, очевидно, могут быть распространены и на стереоэкран с параллельным линейным растром, так как он может рассматриваться как экран с радиальным растром, центр схода растровых полос у которого удален в бесконечность. В плоскости, проведенной через осевые линии зон избирательного видения при проекции двух изображений стереограммы двумя проекторами, образуются две серии зон, расположенных в чередующемся порядке, как это было показано на рис. 79. Из зон, принадлежащих к первой серии, можно наблюдать на экране только одно, например правое, изображение, а из зон второй серии — другое изображение, только левое. Так как зоны расходятся от экрана веерообразно, то только на определенной глубине зрительного зала может удовлетворяться условие, когда правый глаз зрителя может находиться в зоне видения правого изображения, а левый глаз — в зоне видения левого изображения.

Очевидно, при некотором приближении зрителя к экрану расстояния между смежными зонами становятся столь малыми, что в глаза зрителя будут уже попадать лучи не соответствующих зон. Такая же картина наблюдается и при удалении зрителя от экрана. При значительном удалении от экрана ширина каждой зоны становится столь большой, что начинает превосходить нормальное межзрачковое расстояние, а поэтому возникает ситуация, когда оба глаза зрителя находятся в одной и той же зоне видения одного какого-либо изображения стереограммы. По-видимому, ни в первом, ни во втором случае нормальное наблюдение стереоскопической картины на экране будет невозможно.

Еще более наглядная картина в отношении ограничения местонахождения зрителя возникает, если рассмотреть пространственную схему образования зоны избирательного видения. На рис. 83 показано образование одной центральной зоны избирательного видения для радиально-растрового стереоэкрана. Вертикальное сечение этой зоны имеет вид ромба $FGEG_1$, который можно представить образованным в результате пересечения множества световых плоскостей, выходящих от экрана через щели растра. Из любой точки ромба, очевидно, можно видеть все светлые полосы на экране, т. е., иными словами, можно видеть изображение, спроектированное на экран. Из точек пространства, лежащих вне этого ромба, увидеть все светлые полосы на экране нельзя. Следовательно, только из пространства, ограниченного пирамидой, имеющей вершину в точке O , центре схода растровых полос, и основание в виде ромба $FGEG_1$, можно

видеть селективно одно из спроектированных изображений стереограммы. Видеть его можно, конечно, только в том случае, если пространство в виде пирамиды, занимаемое одной зоной избирательного видения, не будет заполнено также частично или полностью зоной видения другого изображения.

Раздельное существование зон избирательного видения для правого и левого изображений возможно только в том случае, если ширина одной зоны меньше промежутка между смежными одноименными зонами. С другой стороны, можно заметить также, что при нахождении глаз зрителя

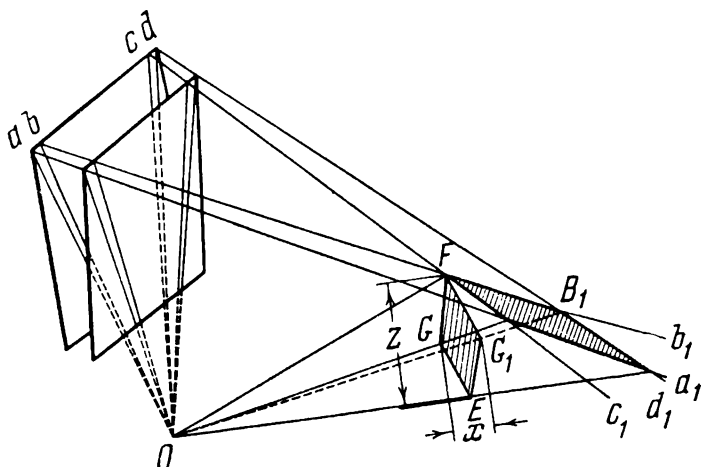


Рис. 83. Образование центральной зоны избирательного видения радиально-растрового стереоэкрана. Схематически изображено поперечное сечение зоны избирательного видения

выше или ниже плоскости, содержащей оси зон избирательного видения, возможность раздельного наблюдения правого и левого изображений стереограммы сохраняется только до высоты $\frac{z}{2}$, где z является вертикальной диагональю ромба.

Высота поперечного сечения зоны избирательного видения z пропорциональна ширине b этой зоны на данном удалении от экрана и зависит от формата экрана и расположения центра схода растровых полос. На рис. 83 схематично показан ход лучей от левого и правого края сечения экрана ab , cd к левому G и правому G_1 краю поперечного сечения одной из зон избирательного видения. Очевидно, лучи aa_1 , bb_1 , cc_1 и dd_1 , пересекаясь, ограничивают в плоскости своего сечения фигуру, похожую на ромб, в пределы которой попадает свет одного из изображений стереограммы. Соединяя вершины этого ромба прямыми с центром схода растровых полос экрана O , мы получаем пространственное тело — пирамиду, боковые поверхности которой ограничивают зону избирательного видения изображения, спроектированного на данное сечение экрана. Высота z , так же как ширина x , сечения этой зоны переменна на разных удалениях от экрана, но отношения высоты к ширине зоны во всех сечениях должны оставаться постоянными, поскольку параллельные сечения пирамиды будут образовывать подобные фигуры.

Рассматривая вертикальное сечение пирамиды вдоль прямой GG_1 (на рисунке не показано), можно заметить, что нижняя половина этого сечения будет подобна треугольнику, образованному секущей экрана ad и лучами, проведенными от концов этой секущей к центру конвергенции O . Полагая высоту нижней половины вертикального сечения зоны избира-

тельного видения в сечении GG_1 равной $\frac{z}{2}$, обозначая ширину экрана через B и ширину сечения зоны избирательного видения в горизонтальном направлении через Q и замечая подобие треугольников, имеющих основание соответственно ad и GG_1 , а высоты — вертикали, опущенные от этих оснований на прямую OE , имеем

$$B : a = N : \frac{z}{2} \quad \text{или} \quad \frac{zB}{2} = aN.$$

Считая полную высоту вертикального сечения зоны избирательного видения равной удвоенной высоте ее нижней половины, получим

$$z = \frac{2N}{B} a.$$

Очевидно, наименьшее значение высоты z получается при расчете по самому наименьшему сечению экрана. Следовательно, в полученной формуле под величиной N надо подразумевать высоту до нижнего края экрана от точки конвергенции раstra O .

При квадратной форме экрана, когда удаление точки схода от нижнего края экрана N составляет $\frac{H}{2} = B$, будем иметь $z = a$, т. е. высота зоны избирательного видения оказывается равной ее ширине. Однако если считать допустимым, что раздельное наблюдение правого и левого изображений стереограмм может ограничиваться только центральной частью экрана, то допустимая величина z может быть определена соответственно для меньшей ширины экрана. Так, если при расчете высоты зоны избирательного видения z принять только одну треть ширины экрана, тогда в рассмотренном выше случае будем иметь высоту зоны z в три раза больше ее ширины a .

Как мы уже заметили, в случае наблюдения стереоскопического изображения необходимо, чтобы глаза находились в пределах соответствующих зон избирательного видения, поэтому положение головы зрителя не должно выходить за пределы допустимых отклонений ни по высоте, ни по ширине данной зоны избирательного видения. Таким образом, положение зрительных мест в зале для стереоскопического рассматривания изображения строго фиксируется. В свою очередь, каждый зритель ограничивается в возможных перемещениях головы.

Используемая глубина зрительного зала. Соединим в плоскости избирательного видения, изображенной на рис. 84, точку O с точками A, a, a_1, A_1 , которые являются границами зоны помех и зоны избирательного видения на оси yy (см. рис. 74). На оси yy , расположенной на расстоянии L_0 от O , величина зон исключительной видимости была определена (см. стр. 109) равной $b = S \left(1 - \frac{2n}{p} \right)$, величина зон помех — равной $t = S \left(\frac{2n}{p} - \frac{1}{2} \right)$. Эта величина при крайнем удалении от экрана не должна превосходить межзрачкового расстояния. На прямой, параллельной оси yy , расположенной на расстоянии x от O , период линий избирательного видения

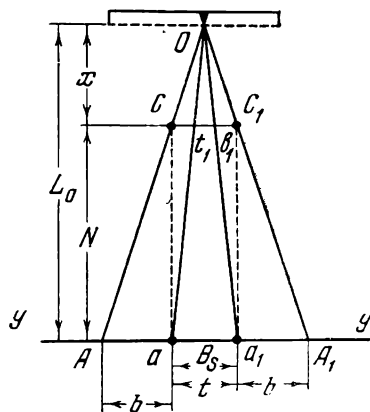


Рис. 84. Определение глубины зрительного зала, используемой при безочковой стереопроекции

$$S_1 = S \frac{x}{L_0}. \quad (2)$$

Тогда соответственно будем иметь:

$$b_1 = b \frac{x}{L_0}, \quad t_1 = t \frac{x}{L_0}.$$

Минимальное расстояние x , при котором еще возможно наблюдать эффект стереоскопичности видения, может быть найдено из условия $t + 2b = 65$ мм, где 65 мм — расстояние между зрачками глаз наблюдателя. Отсюда выводится

$$x' = \frac{L_0}{S} \cdot \frac{65}{\frac{3}{2} - \frac{2n}{p}}, \quad (4)$$

Если, например, принять $\frac{n}{p} = \frac{1}{3}$, и если на оси yy принять $S = 6 \times 65$, то будем иметь

$$x' = \frac{L_0}{5}, \quad (5)$$

т. е. стереоскопическое видение возможно наблюдать на $\frac{4}{5}$ длины зала. Освещенность изображений на оси x составит $\frac{1}{12}$, а на оси, расположенной на расстоянии $x = \frac{L_0}{3}$, освещенность будет максимальной и равной $\frac{1}{3}$.

Возможное отклонение точек наблюдения по горизонтали. Предположим, что на оси yy в плоскости, в которой находятся проекторы, зона помех $t = 15$ мм, тогда зритель может без нарушения стереоскопического видения в этом ряду отклоняться в стороны на $65 - t = 50$ мм.

Когда зритель находится в плоскости наблюдения на расстоянии $x = \frac{L_0}{3}$ от точки O , то основания графиков освещенности окажутся втрое меньшими, чем на оси yy . Если считать, что зритель может находиться между двумя крайними положениями $x_1 = \frac{L_0}{3}$ и $x_2 = L_0$, то на всей плоскости наблюдения (т. е. в $\frac{2}{3}$ глубины зала) стереоскопическое видение будет обеспечено с допустимыми отклонениями зрителя от 15 до 65 мм вправо и влево (в зависимости от удаленности до экрана).

П о л у т е н и. Ввиду того, что выходной зрачок объектива представляет некоторую светящуюся поверхность, светлые полосы на экране оказываются окаймленными полутеньями, которые, в свою очередь, создают полутени у краев зон видения. Полутени возрастают с удалением от точки O и будут иметь максимальную величину на оси расположения проекторов. Здесь они наиболее значительно увеличивают ширину зоны помех t . Освещенность мешающего изображения в этой полутени уменьшается не линейно, но со значительно большей скоростью по мере удаления от границы полутени. Таким образом, уже на половине ширины, захватываемой полутенью, мешающее изображение не оказывает заметного действия.

Допустимые отклонения точек наблюдения в вертикальном направлении. Когда глаза зрителя находятся на некоторой высоте от плоскости избирательного видения, то возрастают ограничения для раздельного наблюдения изображений допустимых отклонений зрителя от центрального положения ввиду уширения зоны помех. Если b — ширина экрана, а — расстояния от центра экрана до точки конвергенции O , то для зрителя, находящегося на высоте h от плоскости избирательного видения, величина зоны помех, разделяющая зоны исключительного видения, увеличивается до $\frac{bh}{a}$. Если имеем прямоугольный экран со стороной b и центром, расположенным на расстоянии $2,5 b$ от точки O , то получим $\frac{bh}{a} = \frac{h}{2,5}$.

Практически это значит, что если глаза зрителя располагаются на 1 см ниже или выше плоскости избирательного видения, то величина зоны помех увеличивается не более чем на 4 мм.

Паразитные изображения. Свет, рассеянный поверхностью растра, может создать паразитные изображения. Рассмотрим паразитные отражения для трехплоскостного растра. Паразитное отражение от первого растра F_2 может быть видно, так как на этот растр падает значительно большее количество света, чем на экран. Если отношение поверхности полос растра F_2 к общей его площади равно 0,45 и растр полностью освещается лучами двух проекторов, то при коэффициенте поглощения черной краски, равном 0,94, относительная яркость паразитного отражения от растра F_2 будет

$$2 \cdot 0,45 \cdot 0,06 = 0,054.$$

Можно окрасить растр F_2 черным блестящим лаком, тогда поверхность его будет зеркально отражать свет в пространство, где нет зрителей, и таким образом будут ликвидированы паразитные изображения.

Перераспределение светового потока в зонах избирательного видения. На ограничение видимости отдельных изображений в зонах избирательного видения у растровых стереоэкранов в значительной мере влияет перераспределение светового потока, вызываемое у экранов с щелевым растром, за счет дифракционных явлений, неточностей выполнения самого растра, а также за счет конечной протяженности источника света (т. е. выходного зрачка проекционного объектива), освещающего растр.

У стереоэкранов с линзовым растром перераспределение освещенности в зонах избирательного видения связано главным образом с дефокусировкой линзами растра изображения светлых полос на экране и с фокальной несопряженностью плоскости экрана с плоскостью зон избирательного видения. Некоторую роль в последнем случае играет также форма и размер светящегося тела источника света, служащего для проекции изображения на экран. Перераспределение светового потока в зонах избирательного видения у экрана с щелевым растром выражается в сильном уширении зон избирательного видения и в уменьшении осевой концентрации света, в результате чего снижается максимальная освещенность вдоль оси зоны.

Практическим недостатком получаемого распределения освещенности зон избирательного видения у экрана с линзовым растром является то, что освещенность в поперечном сечении зоны очень быстро спадает к краям. При веерообразном расхождении зон избирательного видения у радиально-растрового стереоэкрана это приводит к тому, что глаза зрителей, сидящих только в нескольких центральных рядах перед экраном, находятся в зонах наилучшего освещения, т. е. на участках, соответствующих максимальной яркости наблюдаемого изображения. Зрители же, сидящие в более удаленных и передних рядах, оказываются в условиях, когда их глаза находятся на спадах освещенности. Причем незначительное отклонение головы в сторону приводит к неодинаковому освещению правого и левого глаза зрителя. Один глаз в этом случае начинает видеть более яркое изображение, а яркость изображения, видимого другим глазом, уменьшается. Такая неравномерная световая нагрузка на правый и левый глаз вызывает зрительное утомление при наблюдении стереокартины, а в случаях сильного нарушения светового баланса для правого и левого глаза приводит к полной потере восприятия стереоскопического эффекта. Для улучшения условий наблюдения стереоскопического изображения на растровом стереоэкране желательно иметь уширение зон избирательного видения в области с максимальной освещенностью.

Как мы заметили раньше, линзовый растр представляет собой сетку, составленную из большого числа рядом расположенных мелких линз. Эти линзы могут быть сферическими, цилиндрическими, коническими и другими, в зависимости от назначения и условий работы растра. Так, линзовый растр с цилиндрическими элементами работает аналогично щелевому растру с параллельной линиатурой, линзовый растр с коническими элементами — аналогично радиальному щелевому растру.

Растр с линзовыми элементами должен располагаться на строго определенном расстоянии от отражающей плоскости экрана, чтобы проходящие через линзовые элементы лучи света фокусировались на отражающей поверхности экрана. Лучи же, идущие обратно от отражающей поверхности экрана, после прохождения через линзы растра идут параллельным пучком вдоль осевых линий (или плоскостей), собираясь в точках схода вторичных лучей, как у щелевого растра. Отличным является лишь то, что свет, отраженный экраном, концентрируется в более узких зонах около осевых линий зон избирательного видения. Вследствие большой концентрации светового потока в сравнительно узких зонах избирательного видения освещенность в этих зонах возрастает пропорционально концентрации света по сравнению с концентрацией света в зонах избирательного видения при щелевом растре.

Если сравнивать действие линзового растра с действием щелевого растра, то можно заметить, что, во-первых, лучи света, в значительной мере поглощаемые непрозрачными элементами щелевого растра, в линзово-растровом экране почти полностью возвращаются обратно в пространство зрительного зала, собираясь в зонах избирательного видения. В результате более полного использования светового потока в данном случае получается значительный выигрыш. Если у щелевого растра с относительным отверстием $1:3$ в зал возвращается только $\frac{1}{9}$ часть лучей, то при применении линзового растра почти все лучи, за исключением незначительного поглощения и рассеяния самим растром, соберутся в зонах избирательного видения, а следовательно, освещенность этих зон возрастет в 8—9 раз. Но не только за счет этого увеличится яркость наблюдаемого из этих зон изображения на экране, она увеличится также за счет того, что при применении линзового растра лучи света, концентрирующиеся в зонах избирательного видения, собираются более плотно на меньшей площади. Так, если поперечная протяженность зоны избирательного видения при линзовом растре сократится в пять раз по сравнению с шириной зоны щелевого растра, то концентрация света в зоне возрастает также в пять раз, а учитывая увеличение освещенности за счет большего пропускания растра, мы получим общее увеличение яркости наблюдаемой картины в 40—45 раз по сравнению с яркостью картины, видимой при таких же условиях проекции на экране с щелевым растром.

Перспективный растровый линзовый стереоэкран. В практическом отношении для стереоскопической проекции наиболее интересен линзовый растр с коническими элементами, образующий радиальную структуру, подобную радиальному щелевому перспективному растру. Экран с таким растром позволяет осуществлять безочковое наблюдение стереоскопического изображения одновременно многими зрителями.

Экран с линзовым растром, составленным из конических линзовых элементов, расположенных так, что в каждом горизонтальном сечении растра они имеют одинаковую ширину, для стереоскопической кинопроекции в 1936 г. предложил применить С. П. Иванов. Теперь этот экран, известный под названием «светосильный стереоэкран с перспективным оптическим растром», используется для демонстрации стереоскопических кинофильмов безочковым методом. Он собирается из отражательного

экрана с диффузно-рассеивающей поверхностью и установленного перед ним линзового растра, представляющего собой полированное зеркальное стекло с нанесенными на нем узкими полосками конических линз, граничащих друг с другом. Линза составляет узкую часть усеченного конуса с большим радиусом кривизны. Практически при размере стереоэкрана 3×3 м отдельная коническая линзочка длиной 3 м должна иметь ширину в верхней части экрана около 3 мм, а в нижней части — около 1 мм. При этом толщина линзочки в верхней части экрана составляет всего 8—9 мм, а в нижней части — около 4 мм. На рис. 85 показана схема проекции на стереоэкран с линзовым радиальным растром.

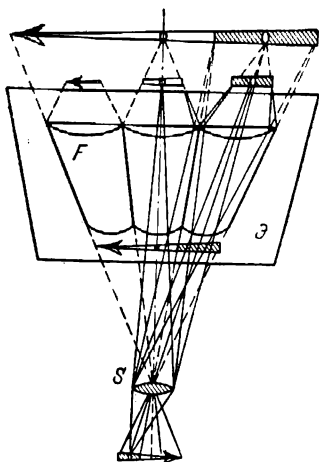


Рис. 85. Стереоэкран с линзовым радиальным растром

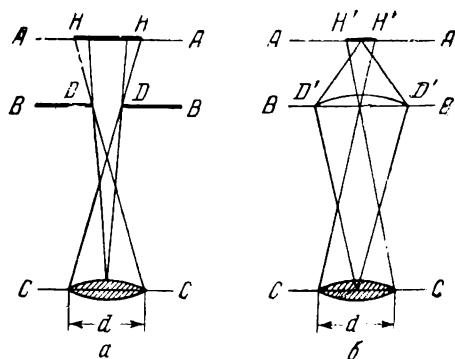


Рис. 86. Ход лучей через щелевой элемент растра (а) и линзовый элемент (б)

Действие светосильного радиального линзового стереоэкрана происходит таким образом. Свет от проектора, падающий на линзовый растр, проходит через его преломляющие элементы и образует на отражающей поверхности экрана светлые полосы. Ширина этих полосок зависит от оптических свойств линзовых элементов, от их фокусного расстояния, от их относительного отверстия и т. п.

На рис. 86 показан сравнительный ход лучей через элемент щелевого растра (рис. 86, а) и через линзовый элемент светосильного растра (рис. 86, б). Несмотря на то, что ширина щели у щелевого растра меньше ширины конической линзы у светосильного растра в том же сечении экрана, при прочих равных условиях ширина светлой плоскости $H'H'$ на экране за линзовым элементом много меньше ширины полосы NN' , получаемой за щелью растра. Следовательно, в узких плоскостях, получаемых на экране за линзовыми элементами, концентрация света будет большей, чем за щелевыми элементами, и освещенность их окажется также значительно большей.

Если проследить обратный ход лучей, отраженных экраном через щелевой и линзовый элементы, то можно заметить, что лучи по выходе из щели рассеиваются довольно широким пучком, а лучи, вышедшие из линзового элемента, собираются в узкий пучок. В плоскости избирательного видения на оси, проходящей через проекционный объектив CC , в первом случае образуется освещенная полоса, значительно превышающая по ширине поперечник действующего отверстия объектива, а во втором случае (при точной фокусировке линзово-растрового экрана) ширина этой полосы оказывается равной действующему отверстию объектива d . При освещении всего стереоэкрана пучком лучей из одного проектора отраженные от

экрана лучи образуют зоны избирательного видения, расходящиеся веером, так же как это происходит при проекции через щелевой радиальный растр. Все зоны избирательного видения лежат в одной плоскости и вдоль любой прямой, параллельной экрану; расстояния между этими зонами постоянны. Из зон избирательного видения можно увидеть через линзовые элементы растра светлые полосы на отражающей поверхности экрана. При перемещении зрителя вправо или влево в плоскости зон избирательного видения светлые полосы на экране либо будут пропадать, либо хорошо видны, в зависимости от того, будут ли глаза зрителя находиться в зоне избирательного видения или нет. Если спроецировать на такой стереоэкран два изображения стереограммы двумя проекторами, удаленными по горизонтали друг от друга на расстояние нормального стереобазиса, то в зрительном зале перед экраном образуются две серии зон избирательного видения для правого и левого глаза зрителей. Из любой пары таких зон зритель может наблюдать непосредственно без каких-либо индивидуальных зрительных устройств стереоскопическую картину.

Благодаря свойству линзового растра фокусировать на отражающей поверхности стереоэкрана изображение в виде узких полосок, в несколько раз более узких, чем поперечник самих линзовых элементов, оказывается возможным осуществить с помощью такого экрана многостереопарную и панорамно-стереоскопическую проекцию, которые нами будут рассмотрены далее.

Сверхсветосильный линзово-растровый экран ангармонического класса. В том случае, когда применяется линзовый растр с цилиндрическими или коническими линзовыми элементами, на отражающей плоскости экрана, поставленной за растром, образуются, как мы заметили, более яркие полосы, чем в случае применения щелевого растра. Усиливается также освещенность в зонах избирательного видения, а сами зоны становятся более узкими. Свет, рассеянный при щелевом растре в широких зонах, собирается линзовым растром в более узкие зоны. Однако такая концентрация света происходит только за счет сужения зон в одном направлении — по ширине; сужения же площади зон по длине не происходит. Если воспользоваться линзовым растром, составленным из элементов в виде сферических линз, то на отражающей плоскости экрана можно получить вместо светлых линий серию изображений в виде светящихся точек.

Яркость этих изображений значительно превосходит яркость полос, рисуемых цилиндрическими и коническими линзовыми элементами. Это вполне понятно, так как световой поток, освещающий растр, собирается сферическими линзами растра на экране суммарно на меньшей площади, чем в предыдущих случаях. Оказывается, что если выполнить определенные условия для периодичности распределения линзовых элементов на поверхности растра, то можно получить концентрацию света, отраженного таким линзово-растровым экраном не вдоль зон избирательного видения, а в отдельных узлах, расположенных на осевых линиях этих зон. Так, если воспользоваться регулярным линзовым растром со сферическими элементами, расположенными вдоль двух рядов пересекающихся параллельных линий, то при условии параллельности плоскости экрана с плоскостью растра образуются узлы зон избирательного видения в одной общей плоскости перед растром. Расположение узловых зон оказывается подобным расположению линзовых элементов на самом растре. Описанная схема является частным случаем получения точечных зон избирательного видения, расположенных в плоскости, параллельной плоскости линзово-растрового экрана.

Более общее решение задачи получения точечных зон избирательного видения находится в случае наклонного расположения экрана по отношению к линзовому растру. При наклонном расположении экрана по отно-

шению к растру, как показывает теория, существенным для получения узловых зон избирательного видения оказывается расположение линиатуры, вдоль которой распределены линзовые элементы на поверхности растра. Для получения узловых зон избирательного видения в пространстве перед растром необходимо, чтобы центры сферических линзовых элементов располагались вдоль прямых линий, расходящихся пучком из точки, лежащей на пересечении плоскостей экрана и растра. При этом направление лучей должно быть таким, чтобы они пересекали на равных отрезках любую прямую на поверхности растра, проведенную параллельно прямой пересечения растра с экраном, т. е. чтобы соблюдалось постоянство

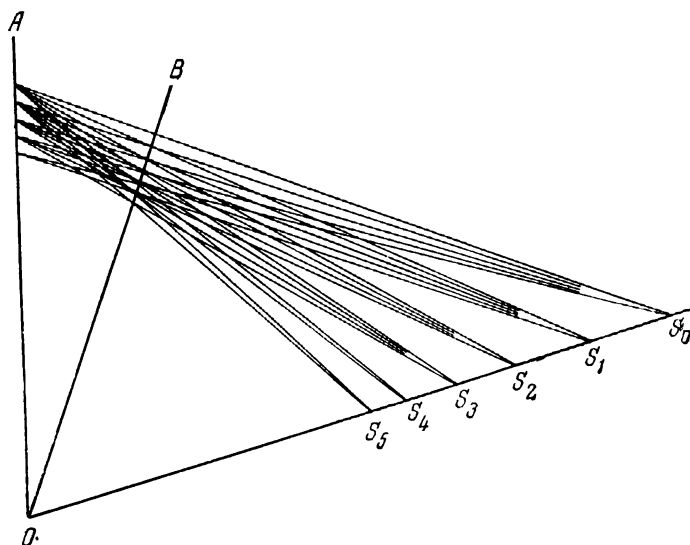


Рис. 87. Схема образования точечных зон избирательного видения при наклонном положении растра

линейного периода этих лучей. Расположение же центров линзовых элементов вдоль этих лучей должно удовлетворять постоянству сложного ангармонического соотношения для любых смежных лучей, проведенных через центры этих элементов из центра проекции (от проекционного объекта) на экран.

На рис. 87 дана схема образования точечных зон избирательного видения при наклонном расположении растра OB по отношению к экрану OA . В данном случае узловые (точечные) зоны избирательного видения S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 лежат в плоскости, проходящей через прямую пересечения растра и экрана и через центр проекции (проекционный объектив) S_0 . Эта схема представляет ход лучей в вертикальном сечении, проведенном через центр экрана; но можно представить себе другие сечения, проходящие через центр любой узловой зоны избирательного видения и через любой горизонтальный ряд линзовых элементов растра. В этих сечениях легко обнаружить, что узловые зоны избирательного видения существуют не только в рассмотренном нами вертикальном сечении. Узловые зоны располагаются также на прямых, параллельных прямой пересечения плоскостей экрана, растра и проходящих через центры $S_0, S_1, S_2, S_3, \dots$ и т. д.

Таким образом, оказывается, что узловые зоны избирательного видения у такого экрана все лежат в одной плоскости, проходящей через след пересечения растра с экраном. В этой плоскости узловые зоны располагаются вдоль лучей, выходящих из центра схода осевых линий растровых элементов (O), и лежат на пересечениях с рядом прямых, параллельных

следу пересечения растра с экраном. В узловых зонах избирательного видения такого экрана при точной фокусировке изображения линзовыми элементами растра может быть получена особенно большая концентрация света, делающая стереоэкран особенно светосильным. При практическом осуществлении такого сверхсветосильного стереоэкрана ангармонического класса можно было бы сферические линзовые элементы заменить двумя рядами пересекающихся цилиндрических и конических линз.

В оптическом отношении линзовые элементы растра могут быть охарактеризованы следующим образом. Линзовый элемент представляет собой стеклянный цилиндр со сферическим основанием. Передняя сферическая поверхность является объективом, а задняя — главной фокальной поверхностью этого объектива. При малых размерах линзовых элементов (диаметр менее 0,25 мм) все предметы, находящиеся на расстоянии 1 м и далее до бесконечности, практически фокусируются ими в главной фокальной поверхности.

Радиусы кривизны передней и задней сферической поверхностей линзового элемента могут быть определены на основании законов преломления лучей при прохождении через сферическую поверхность. Обозначая через R радиус кривизны преломляющей сферической поверхности, через n — показатель преломления линзового элемента, через f_1 — удаление предмета от преломляющей поверхности и через f_2 — расстояние от преломляющей поверхности до изображения предмета, можно написать для центральных лучей следующее соотношение:

$$\frac{1}{f_1} + \frac{n}{f_2} = \frac{n-1}{R}.$$

Полагая $f_1 = \infty$, получаем

$$f_2 = \frac{Rn}{n-1}.$$

Соотношение радиусов кривизны переднего R и заднего r сферических оснований линзового элемента может быть отсюда получено в следующем виде:

$$\frac{R}{r} = \frac{R}{f_2 - R} = n - 1.$$

Если бы показатель преломления n был равен 2, то $r = R$, т. е. вместо цилиндрика линзовый элемент представлял бы собой шарик.

Приведенное выше соотношение радиусов кривизны справедливо только для лучей центральных, поскольку при выводе этого соотношения не учитывалась сферическая аберрация. Кроме того, это соотношение действительно только для лучей определенной длины волны, именно той, которой соответствует данный коэффициент преломления.

§ 7. РАСТРОВЫЕ ДΙΑСКОПИЧЕСКИЕ СТЕРЕОЭКРАНЫ

Устранение видности паразитных изображений, получаемых в результате отражения от передней поверхности растра, возможно осуществить путем изготовления полированной поверхности самого растра, которая зеркально отражает рассеиваемые ею лучи. Если при этом придать растру такой наклон, чтобы эти рассеянные лучи не попадали в глаза зрителям, то паразитных изображений на поверхности экрана не будет видно. Для устранения видности паразитных изображений можно применить и другой способ, а именно осуществить проекцию стереоскопических изображений на просвет. Стереоскопическая проекция на просвет может быть осуществлена как на стереоэкране с параллельным растром, так и на стереоэкране с радиальным растром. Сами растры могут быть и щелевые и линзовые.

Стереоскопическую проекцию на просвет можно осуществить на полупрозрачный экран с установленными и перед ним и за ним двумя параллельными растрами, как это изображено на рис. 88. Оба растра должны быть с полосами, вертикально направленными и параллельными друг другу.

Двумя проекционными аппаратами с объективами S_1 и S_2 на экран через передний растр проецируются изображения, соответствующие одно — правому глазу, а другое — левому. Лучи, пройдя сквозь растр, создают на экране правое и левое изображения, разбитые на полосы и идущие перпендикулярно к плоскости чертежа. Устанавливая растр на соответственном расстоянии от экрана, можно достичь того, что полосы на экране будут чередоваться одна за другой без наложения.

При равной ширине a прозрачных и непрозрачных полос растра и при удалении объективов S_1 и S_2 друг от друга на расстояние A и от экрана на расстояние l между экраном и растром должно быть соблюдено расстояние

$$r = \frac{al}{A}.$$

Помещая точно такой же растр с другой стороны экрана, симметрично первому, можно при наблюдении глазами из точек GD , симметричных точкам $S_1 S_2$, видеть правым глазом только полосы изображения, соответствующие правому изображению, а левым — левому. Для получения достаточно четкого изображения необходимо применять мелкоструктурные растры.

Для получения двух пар стереоскопических изображений предлагалось применять растр в виде квадратной сетки вместо линейной. Располагая проекционные объективы в два ряда по высоте, при такой сетке можно спроецировать на экран четыре изображения, не налагающихся друг на друга. При рассматривании, поднимая или опуская голову, можно видеть одну и другую пару стереоскопических изображений. Такую же проекцию на просвет можно осуществить и с радиальными растрами. Наиболее просто в техническом отношении устройство щелевого радиально-растрового экрана, работающего на просвет. Перед просвечивающим экраном устанавливаются два радиальных растра с обеих сторон экрана (схема аналогична изображенной в плане на рис. 88), центры конвергенции растровых полос каждого растра совпадают в одной общей точке, лежащей на продолжении плоскости экрана, причем ось пересечения плоскостей обеих растров с плоскостью экрана также совпадает.

Если с одной стороны такого экрана проецировать из точки S_1 одно сопряженное стереоизображение, а из другой точки S_2 — другое, то с другой стороны экрана можно увидеть из точки D первое изображение, а из точки G — второе изображение. Эти же сопряженные изображения можно увидеть и еще из целого ряда точек G_1, D_1, G_2, D_2 и т. д. (на рис. не показаны), лежащих на прямой GD . Соединяя в пространстве все точки G, G_1, G_2 и D, D_1, D_2 с центром конвергенции растровых полос O , можно получить в пространстве зрительного зала линии зон избирательного видения, из которых видно только то или другое из сопряженных изображений.

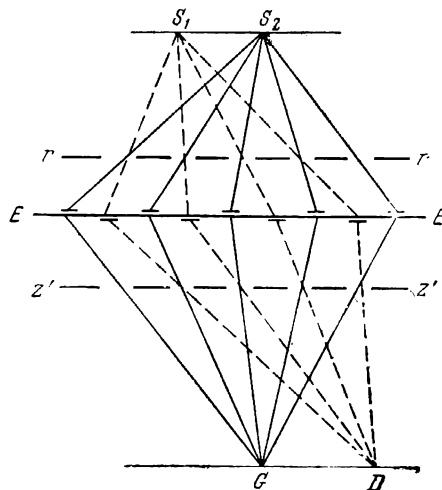


Рис. 88. Стереопроекция на просвет

Вполне понятно, что при таком способе проекции удастся избежать видимости паразитных изображений, но большие потери света в растрах остаются при этом неизбежными. Эти потери удастся уменьшить только с помощью применения линзового растра.

При осуществлении стереоскопической проекции на просвет, помимо устранения паразитных засветок, имеются и другие преимущества. А именно устранение мешающего влияния проекционного пучка лучей для зрителей делает более полной естественность наблюдаемой стереоскопической картины. Вторым немаловажным в практическом отношении обстоятельством является то, что растры по одну и другую сторону просвечивающего экрана могут несколько отличаться друг от друга своим периодом, относительным отверстием, фокусным расстоянием и т. п. Благодаря этому можно, например, в пространстве перед экраном со стороны зрителей получить зоны избирательного видения с другим распределением освещенности, чем в зонах при прямой проекции на отражение. Таким образом, можно создать лучшие условия для наблюдения стереокартины с равномерной яркостью видимых правым и левым глазом изображений на большом диапазоне расстояний от экрана.

§ 8. ПОЛЯРИЗАЦИОННО-РАСТРОВЫЙ СТЕРЕОЭКРАН

Существенным недостатком безочковой стереопроекции, осуществляемой при помощи радиально-растрового стереоэкрана, как мы видели, является то, что зоны избирательного видения в своей плоскости расходятся веером. Расхождение между осями зоны OD , с которой можно наблюдать «правое» изображение на экране, и зоны OG , с которой наблюдается «левое» изображение стереограммы, как видно на рис. 79, постепенно увеличивается по мере удаления от экрана. Вследствие этого только при одном определенном удалении от экрана, т. е. в одном ряду, расстояние между осями правой и соседней с ней левой зоны избирательного видения соответствует нормальному межзрачковому базису. Зрители, сидящие ближе этого ряда к экрану или дальше этого ряда, оказываются в неудовлетворительных условиях для наблюдения стереокартины. Это обстоятельство, как мы отмечали, вызывает дополнительное утомление глаз, ухудшает восприятие зрителями стереоскопического эффекта и ограничивает полезное использование кинотеатрального зала при стереоскопическом показе практически до $\frac{2}{3} \div \frac{1}{2}$ его площади.

Устранение этих недостатков в известной степени может быть получено при поляризационно-растровой системе стереопроекции. Отражательная поверхность экрана делается металлизированной, например, путем покрытия ее алюминиевым порошком с той целью, чтобы она не деполяризовала падающий на нее свет. Перед отражательной плоскостью экрана с некоторым наклоном в вертикальной плоскости устанавливается особый поляризационный растр, составленный из двух родов элементов, представляющих поляроиды с плоскостями поляризации, ориентированными взаимно-перпендикулярно.

На рис. 89 представлен схематично такой поляризационный растр. Он выполнен в виде большого количества горизонтальных полос поляроидной пленки: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, ... и т. д., причем если четные полосы ориентированы, например, для пропускания лучей с вертикальной плоскостью поляризации, то нечетные полосы растра ориентированы так, чтобы пропускать только лучи, поляризованные в горизонтальной плоскости. Каждая полоса вдоль ее длины покрыта серией мелких линзочек или щелевых диафрагм, поперечных полосе и расположенных на строго одинаковых расстояниях одна от другой. Расположение линзовых (или щелевых) элементов в разных полосах различно. Расстояние между элементами в нижних полосах должно быть более тесное, чем в верхних,

но шаг элементов вдоль каждой полосы сохраняется постоянным. Величина шага элементов вдоль каждой горизонтальной полосы является линейной функцией удаленности этой полосы от условной линии центров O_1O_2 (рис. 89).

Если шаг элементов вдоль полосы, удаленной от линии центров на расстояние h , равен p , то для другой полосы, удаленной от этой на Δh , шаг элементов изменится на величину Δp , определяемую равенством

$$\Delta p = \frac{p}{h} \Delta h.$$

Элементы на полосах располагаются так, что их центры оказываются лежащими вдоль радиальных лучей, проведенных от центров O_1 и O_2 , причем лежащих именно так, что элементы на четных горизонтальных полосах располагаются вдоль радиальных лучей, проведенных из одного центра, например O_1 , а элементы на нечетных горизонтальных полосах располагаются вдоль лучей, исходящих из другого центра, т. е. в данном случае из O_2 . Таким образом, получается растр, составленный из элементов двух радиальных растров, несколько смещенных друг относительно друга. Расстояние между центрами O_1 и O_2 должно быть равно нормальной межзрачковой базе. Растр располагается перед отражательной плоскостью экрана таким образом, что линия центров O_1O_2 оказывается лежащей горизонтально на продолжении отражательной плоскости.

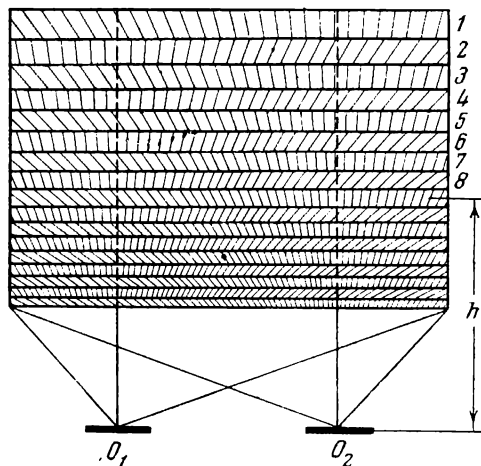


Рис. 89. Схема поляризационного растра, устанавливаемого перед экраном для осуществления безочковой стереопроекции

Проекция стереоскопических изображений ведется при помощи двух проекторов поляризованным светом со взаимно-перпендикулярными плоскостями поляризации лучей, проектирующих «правые» и «левые» изображения стереопары. Поляризация лучей наиболее просто достигается установкой на их пути соответственно ориентированных поляризационных фильтров. Перед объективом проектора, проектирующим «правые» изображения, фильтр устанавливается так, что он пропускает лучи, плоскость поляризации которых совпадает с плоскостью поляризации растровых элементов, расположенных вдоль лучей, исходящих из правого центра, т. е. в нашем случае из центра O_2 , и лежащих на нечетных полосах, т. е. имеющих плоскость поляризации, ориентированную вертикально. Перед объективом проектора, проектирующим «левые» изображения, в этом случае устанавливается поляризационный фильтр с горизонтальным направлением плоскости поляризации.

При соблюдении такой взаимной ориентировки поляризационных фильтров у проекторов и у растровых элементов экрана лучи «правого» проектора, т. е. проектирующего «правые» изображения, будут проходить на экран только через горизонтальные полосы нечетных рядов растра с элементами, ориентированными по радиальным лучам, исходящим из центра O_2 , а лучи «левого» проектора, проектирующего «левые» изображения, будут проходить только через четные ряды горизонтальных полос с элементами, ориентированными по лучам, исходящим из центра O_1 .

Отраженные стереоэкраном лучи будут собираться в осевых линиях, исходящих из центров O_1 и O_2 . В осевых линиях, исходящих из центра O_1 , будут собираться лучи, прошедшие через четные ряды растровых полос с горизонтальным направлением плоскости поляризации, несущие «левые» изображения, а в осевых линиях, исходящих из центра O_2 , будут собираться лучи, прошедшие через нечетные ряды растровых полос с вертикальным направлением плоскости поляризации и несущие «правые» изображения. Таким образом, из осевых линий, исходящих из центра O_1 , можно будет видеть на экране только «левые» изображения стереопары, а из осевых линий, исходящих из центра O_2 , — только «правые» изображения.

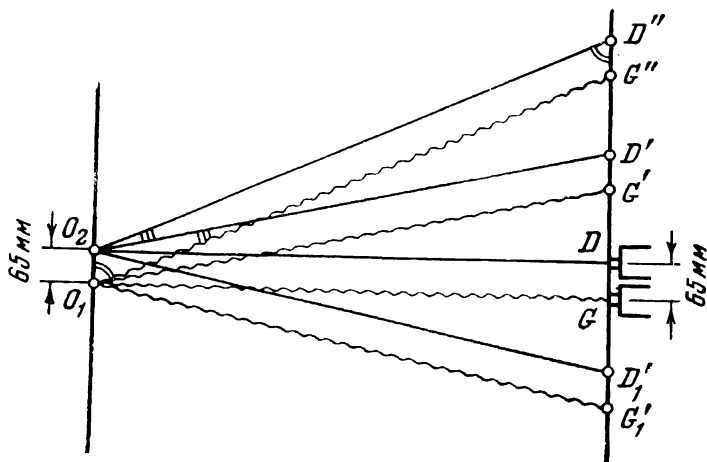


Рис. 90. Образование параллельно расположенных зон избирательного видения для правого и левого глаза при применении поляризационного растрового экрана

Если правый и левый проекторы будут расположены в горизонтальной плоскости так, что между центрами их объективов D и G будет соблюдено расстояние, равное 65 мм, т. е. равное расстоянию между центрами O_1 и O_2 , то осевые линии «правого» и «левого» изображения в плоскости избирательного видения, определяемой положением проекторов и линией центров O_1O_2 , окажутся параллельно расположенными попарно, как это показано на рис. 90. Следовательно, на каком бы удалении от экрана зрители ни находились, они всегда смогут свободно наблюдать стереокартину из параллельных зон избирательного видения, расположенных вдоль рассмотренных осевых линий на нормальном межзрачковом расстоянии.

Воспроизведение стереокартины данным способом выгодно характеризуется тем, что обеспечивает наблюдение картины в условиях одинаковых световых нагрузок на оба глаза зрителя, благодаря чему должно снизиться зрительное утомление при просмотре стереокартины. Кроме того, для большинства зрителей исключается возможность неправильного псевдоскопического восприятия стереокартины, так как при отклонении из зон избирательного видения зритель попадает не в зоны «псевдоскопического видения», а просто потеряет возможность увидеть картину, так как расстояние между несоответствующими зонами избирательного видения может делаться больше нормального стереобазиса.

При практическом осуществлении данной системы стереопроекции проекторы не обязательно должны быть расположены в точках D и G . Правый проектор может быть помещен на любой прямой O_2D , O_2D' , O_2D'' , ... и т. д., а «левый» — на любой прямой O_1G , O_1G' , O_1G'' , ... и т. д.

Ширина элементов раstra на экране практически должна быть достаточно малой, чтобы зрители не смогли различать отдельных элементов раstra. Ширина горизонтальных полос раstra у нижнего края экрана должна быть меньше, чем у верхнего края.

В заключение следует заметить, что данная система стереопроекции, обеспечивая возможность безочкового наблюдения стереокартины для зрителей, сидящих в партере (в котором располагается плоскость избирательного видения), дает в то же время возможность наблюдать стереокартину, пользуясь полироидными стереоочками, с балконов, верхних ярусов, из лож, т. е. всего пространства зрительного зала.

§ 9. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ЭКРАНЫ

С. П. ИВАНОВА и А. Н. АНДРИЕВСКОГО

Для безочкового воспроизведения стереоскопической картины с параллельным расположением зон избирательного видения могут также служить предложенные С. П. Ивановым и А. Н. Андриевским многофокальные оптические системы кольцевых растров, названные изобретателями интегральными экранами. Интегральные экраны явились дальнейшим развитием известных ранее кольцевых растровых оптических систем, от которых они отличаются тем, что фокусирование лучей производят не в точке а в фокальной линии. При этом многоцентровые интегральные экраны собирают лучи от одного источника света в целом ряде таких фокальных линий. Интегральный экран представляет собой растровую систему, составленную из многочисленных преломляющих или зеркальных отражающих оптических элементов, расположенных по концентрическим окружностям, благодаря чему система обладает значительным количеством фокусов. Число фокусов этой системы равно числу серий концентрических колец растровых элементов.

Отличительной чертой многофокального стереоэкрана является то, что лучи, спроектированные из одной точки на такой экран после прохождения через экран, работающий на просвет, собираются в фокальных зонах за экраном, расположенных вдоль осей, проходящих через центры концентрических колец, по которым расположены растровые элементы, и через точку проекции. При проекции на отражательный интегральный экран фокальные зоны образуются перед экраном по осям, проходящим через центры колец растровых элементов и точки, симметричные относительно центров проекции. Если на такой экран проектируются лучи из нескольких центров одновременно, то система фокальных зон возникает от каждого центра проекции на экран.

Для выяснения принципа действия такого экрана мы вначале рассмотрим действие одной серии концентрических элементов кольцевого раstra, а именно характер рассеяния света преломляющим кольцевым элементом. Представим себе кольцо (тор), выполненное из прозрачного материала с круглым сечением. Если на это кольцо падают лучи от точечного источника света S (рис. 91), то каждое сечение кольца производит фокусирование лучей, расходящихся далее за фокусом, как показано на рисунке. В любом главном сечении кольца, проведенном через его центр O и через источник света S , можно заметить, что лучи, продолженные за фокус данного сечения кольцевого элемента, рассеиваются таким образом, что пересекают, начиная от точки P , прямую, проходящую через точечный источник света и центр кольца. Вращая плоскость сечения кольцевого элемента вокруг оси SO , можно будет получить такую же картину рассеяния света для любого сечения, т. е. рассеянные кольцевым элементом лучи будут при своем продолжении за фокус элемента пересекать ось OS за точкой P . Очевидно, если поместить глаз в любую точку на прямой OS за точкой P , то можно будет увидеть освещенным все кольцо, так как от

всех сечений этого кольца лучи придут к глазу. Таким образом, преломляющее кольцо направляет все лучи, падающие на него от точечного источника света, в фокальную линию, лежащую за кольцом на продолжении оси, проходящей через источник света и центр этого кольца.

При наличии ряда подобных преломляющих колец, concentрически расположенных вокруг одного центра, очевидно, все кольца будут давать рассеяние лучей, проходящее через одну и ту же прямую, являющуюся продолжением оси, проходящей через источник света и центр concentрических колец. Следовательно, образуется общая фокальная линия для всей серии concentрических колец. Здесь мы рассмотрели —

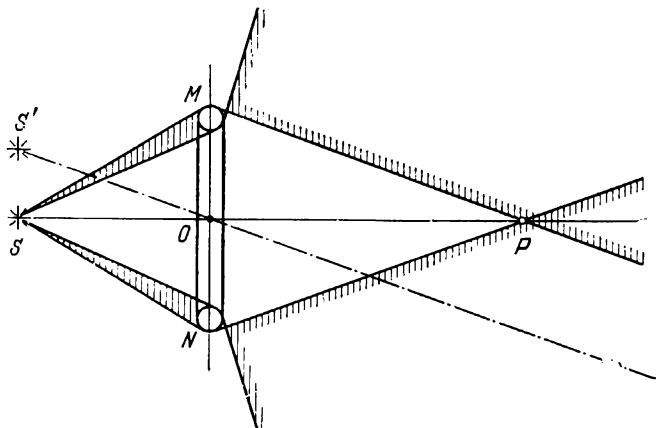


Рис. 91. Схема прохождения лучей через преломляющее кольцо

для простоты — рассеяния лучей на преломляющем кольце круглого сечения, но точно такую же картину рассеяния можно было бы наблюдать и при других формах сечений преломляющих колец. Эти кольца могут образовывать вогнутые профили в поверхности прозрачного преломляющего материала, могут иметь самый разнообразный профиль сечения и все же будут давать рассеяние света от всех сечений кольца, проходящее через ось SO . В зависимости от формы сечения колец и от преломляющих свойств материала этих колец будет изменяться на этой прямой положение точки P , за которой можно наблюдать освещенным рассматриваемое кольцо. Нетрудно заметить, что уже при незначительных отклонениях от оси SO глаз не сможет увидеть освещенным все кольцо, так как при таком отклонении в глаз наблюдателя тогда будут приходить лучи не от всех сечений кольца. Точно такую же картину рассеяния лучей можно наблюдать в отраженном свете для зеркальных колец различного профиля. Если на поверхность плоского зеркала нанести ряд concentрических расположенных кольцевых отражательных элементов, то можно воспроизвести описанную выше картину рассеивания света. На рис. 92 изображена такая система плоского зеркала в разрезе, на поверхности которого нанесен ряд кольцевых concentрических, хорошо отполированных колец 1, 2, 3, 4 и 5. Форма отражающей поверхности таких колец, показанная в разрезе, представляет собой тороид. При освещении всей системы колец пучком параллельных лучей, направляемым вдоль оси перпендикулярно к плоскости расположения колец и проходящим через центр всех concentрических колец B , можно наблюдать, что почти все лучи света, упавшие на любой кольцевой элемент, при своем отражении пересекают ось BD , соединяющую центр кольцевых элементов B с центром проекции лучей D .

При этом можно заметить, что некоторые лучи пересекут ось за источником света или в бесконечности.

На рис. 92 показаны только лучи, отраженные от второго и пятого кольцевого элемента, и их пересечение дано в произвольно выбранных точках $F_1, F_2, F_3, F_4, \dots$. Однако пересечение всей совокупности лучей происходит не только в этих точках, но и непрерывно вдоль всей прямой BD .

При нахождении глаза зрителя в любой точке оси BD , очевидно, он увидит отражение лучей от всей поверхности каждого кольцевого элемента, т. е. увидит всю поверхность ABC в виде ряда светящихся тонких колец. Если делать кольцевые элементы очень узкими, лежащими за пределами

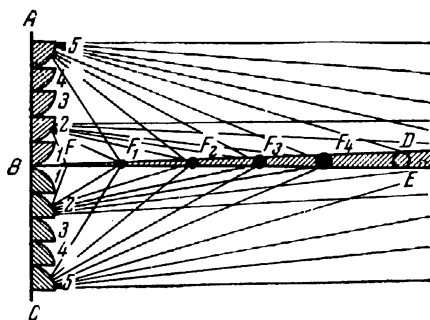


Рис. 92. Плоское зеркало с concentрическими зеркальными кольцами

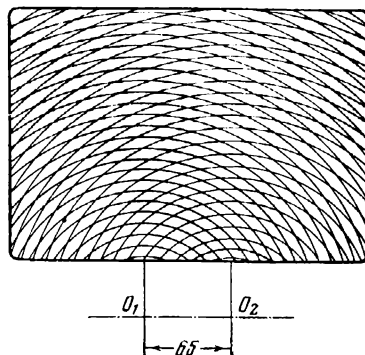


Рис. 93. Схема двухфокального экрана, составленного из concentрических колец, образованных из двух центров

разрешающей способности глаза, то из данной точки наблюдения зритель увидит всю поверхность экрана равномерно освещенной. Как мы видим, образованная кольцевыми элементами поверхность экрана обладает свойством направленного рассеивания лучей, при своем продолжении пересекающих общую осевую линию, которую можно назвать фокальной линией экрана. Поверхность интегрального экрана представляет собой сопряжение оптических элементов в виде тонких зеркальных или преломляющих колец различных радиусов с центром всех колец в одной точке.

Для многофокального экрана размещение центров различных колец происходит в ряде точек; так, например, для двухфокального экрана — в двух точках O_1 и O_2 , как показано на рис. 93.

Многоцентровая форма интегрального экрана позволяет получить фокальные линии, расположенные в различных плоскостях, что имеет существенное значение, например, для размещения зрителей, наблюдающих стереоскопическую картину не только в одной плоскости партера, но и на балконах. В зависимости от назначения экрана рассеивающие кольца, составляющие его поверхность, могут быть либо сплошными, либо составленными из отдельных зеркальных или преломляющих элементов с различной конфигурацией сечения рассеивающих колец. Интегральный экран при проекции на него стереоскопического изображения не требует диффузно-рассеивающей поверхности. В этом состоит его отличительная особенность от рассматриваемого ранее класса линзово-растровых экранов. Другой отличительной особенностью интегрального экрана является то, что он возвращает в фокальные зоны почти весь свет, направленный на него от источников света, за исключением незначительной части рассеяния при прохождении светового потока через прозрачный растр или при отражении от зеркальной поверхности.

Яркость видимого изображения на интегральном экране зависит от следующих причин: светосилы рассеивающих колец, составляющих по-

верхность интегрального экрана; их избирательного действия; рассеивающей способности всей системы, которая практически определяется величиной составляющих рассеивающих элементов; способности сепарирования света, направленного на один и тот же участок поверхности экрана из многих источников; способности суммировать световые потоки в строго определенном направлении в пределах фокальных зон; емкости рассеивающей поверхности экрана, заключающейся в способности разделить лучи, падающие на экран, от разных источников света.

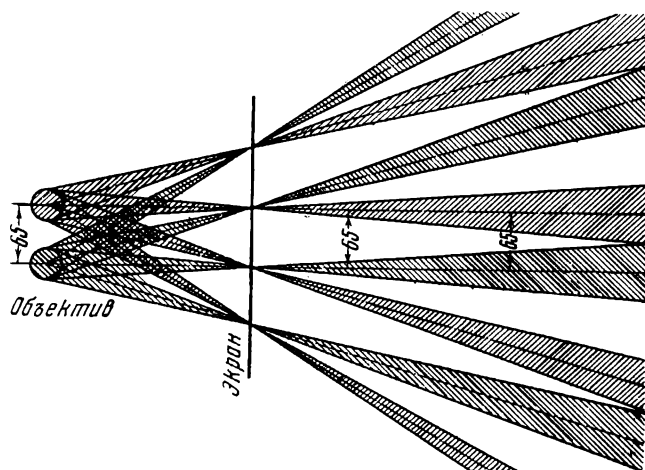


Рис. 94. Образование фокальных зон интегрального экрана с четырьмя центрами при проекции двух частичных стереоизображений на просвет

Одной из существенных особенностей работы интегрального экрана является возможность получения параллельного пучка фокальных зон для лучей, проектирующих частичные стереоскопические изображения. Рассмотрим как это достигается.

На рис. 94 показаны фокальные зоны работающего на просвет интегрального экрана с четырьмя центрами кольцевых элементов при проекции одной пары стереоскопических изображений. Как видно на рисунке, фокальные зоны, из которых можно видеть правое и левое изображения, оказываются взаимно параллельными, если между центрами кольцевых зон на экране и между центрами проектирующих изображения объективов соблюдено одно и то же расстояние. Если это расстояние равно 65 мм, то на любом расстоянии от экрана зритель может занять положение, при котором его правый и левый глаз будут находиться на осях фокальных зон. Следовательно, зритель, находящийся в зале, с любого места может нормально видеть стереоскопическую картину с одинаковой яркостью правого и левого изображений. Но на интегральные экраны можно проецировать не одну пару стереоскопических изображений. Такая многостереопарная проекция в принципе позволяет создать более благоприятные условия для наблюдения пространственной стереокартины.

Идея интегральных экранов получает дальнейшее практическое и теоретическое развитие. Новые типы предложенных интегральных экранов, названные софокусно-линейными растровыми системами, представляют собой семейства эллиптических колец. Они предложены и исследованы Н. И. Крыловым. Очевидно, в области новых растровых оптических систем имеются разнообразные возможности для осуществления совершенной безочковой стереопроекции.

§ 10. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С МНОГОЗРАЧКОВЫМИ ВЫХОДАМИ ДЛЯ БЕЗОЧКОВОГО НАБЛЮДЕНИЯ СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЙ

Метод автостереоскопии, как мы видели, наметил пути для решения задачи безочковой сепарации стереоскопических изображений. Однако пока этот метод давал возможность наблюдения стереоскопической картины одному зрителю, он мало чем отличался в смысле практических достоинств от других методов стереоскопического наблюдения, пользовавшихся для сепарации двух изображений стереограммы индивидуальными зрительными устройствами в виде стереоскопов или специальных стереоочков. Действительно, в данном случае растр заменял собой индивидуальный зрительный прибор; он по существу также был индивидуальным зрительным устройством, но неразрывно связанным с самой стереограммой. Таким образом, оказывалось, что зритель как бы наблюдал теперь каждую стереограмму через зрительное устройство, неотделимо скрепленное с каждой отдельной стереограммой. Все неудобства пользования индивидуальным зрительным устройством при рассматривании стереоскопических изображений оставались и при рассматривании автостереоскопических изображений. Зритель и в этом случае мог только один наблюдать через свой зрительный прибор (растр) стереоскопическую картину, при этом он видел ее из строго определенного положения.

Дальнейшее развитие метода автостереоскопии привело к созданию растровой сепарации стереоскопических изображений одновременно для многих лиц и открыло новые возможности в технике воспроизведения пространственных изображений, качественно отличные от классических методов сепарации стереоскопических изображений. Еще совсем недавно казалось почти невозможным осуществить показ стереоскопического изображения одновременно многим лицам, свободно наблюдающим это изображение без всяких очков или других зрительных приборов.

В настоящее время специальные растровые экраны позволяют осуществить такую стереопроекцию, которая дает возможность видеть пространственную картину большому числу лиц свободно, без всяких очков, со многих мест зрительного зала одновременно.

Однако для осуществления безочковой стереоскопической проекции вполне возможно применить экраны в виде большой линзы или большого вогнутого зеркала. Рассмотрим несколько подробнее принцип действия такого рода экранов.

Линзовый экран. Если взять в качестве проекционного экрана большую линзу и на нее спроектировать при помощи проекционного аппарата какое-либо изображение, как это показано на рис. 95, то, очевидно, это изображение можно будет увидеть только из одной точки, находящейся за линзой, в которой собираются лучи, вышедшие из проекционного объектива этого аппарата, т. е. из той точки, в которой линзой рисуется изображение выходного зрачка объектива. Совершенно понятно, что если расположить рядом с первым проекционным аппаратом второй проектор, рисующий на поверхности линзы другое изображение, то это изображение можно будет увидеть глазом из соответственно другой точки пространства, в которой собираются лучи, вышедшие из объектива второго проектора. Если точки схода лучей за линзой от одного и другого проектора будут расположены по горизонтали на удалении, равном межзрачковому расстоянию, а на линзу будут проектироваться каждым проектором соответственные изображения одной и той же стереограммы, то зритель сможет увидеть сепарированно каждым глазом частичное изображение стереограммы, а следовательно, он увидит бинокулярно синтезированное стереоскопическое изображение.

Чтобы обеспечить одновременное наблюдение стереоскопического изображения несколькими зрителями, необходимо на линзовый экран

проектировать изображения стереограммы несколькими парами проекторов. Но можно поступить и иначе: вместо применения нескольких пар проекторов при помощи светорасщепительных систем разбить пучок лучей, выходящий из каждого проекционного объектива, на несколько пучков. Каждый в отдельности такой пучок лучей будет рисовать на линзе полное изображение своей части стереограммы, а центр проекции такого пучка оказывается отличным от центра проекции других пучков. За

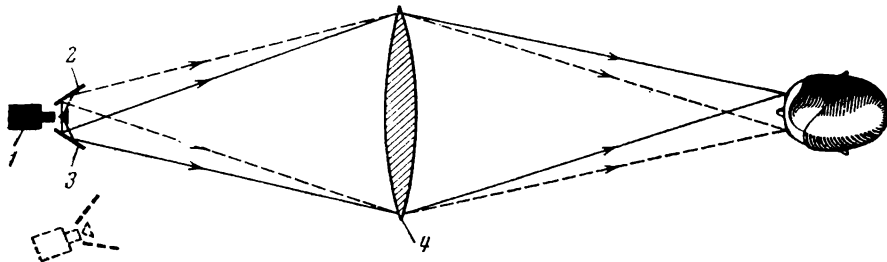


Рис. 95. Схема, позволяющая наблюдать пространственное изображение без очков при стереоскопической проекции на большую линзу:

1 — проектор; 2 — левое изображение; 3 — правое изображение; 4 — экран-линза

линзой каждый пучок будет собираться отдельно от других пучков. Очевидно, на сколько пучков будет разбит световой поток, выходящий из проекционного объектива, столько будет создано точек для наблюдения стереоскопической картины за линзой. Расщепление пучка лучей, конечно, должно быть сделано для проекционных лучей, выходящих из обоих объективов. В качестве расщепительных систем могут быть использованы полупрозрачные зеркала, множительные призмы и другие оптические системы. Такая стереоскопическая система проекции со светорасщепительной системой, обеспечивающей 25 позиций для наблюдения стереоскопической картины, разрабатывалась по предложению проф. М. М. Русинова в Ленинградском институте точной механики и оптики.

Зеркальный экран. Обычно в оптике действие любой диоптрической линзовой системы может быть воспроизведено также при помощи катоптрической зеркальной системы, и в данном случае аналогом линзового стереоскопического экрана может служить зеркальный стереоэкран. В отражающем экране должно применяться вогнутое сферическое или параболическое зеркало. Схема действия такого экрана представлена на рис. 96. Так же как и в случае проекции на линзовый экран, можно представить, что сопряженные изображения проектируются на экран двумя проекторами. Сам экран представляет собой вогнутое зеркало большого размера. Лучи после отражения от поверхности зеркала собираются в сходящиеся пучки, рисующие в пространстве перед зеркалом изображения выходных зрачков обоих проекционных объективов. Если изображения этих зрачков так взаимно расположить, чтобы можно было поместить в этих же точках пространства глаза зрителя, то каждым глазом зритель сможет увидеть в зеркале свое сопряженное изображение стереограммы. Психофизиологическое суммирование этих сопряженных изображений при бинокулярном видении и создает пространственный образ наблюдаемой картины.

Стереопроекция с применением вогнутого зеркала, так же как и проекция через линзу, дает возможность некоторого подравнивания ак-

комодационных усилий зрителя с состоянием конвергенции глаз. Это — известное достоинство данной системы стереоскопической проекции, так как уменьшает утомляемость зрения, сопровождающую наблюдение стереокартины. Возможность обеспечения одновременного показа стереокартины многим зрителям при данной системе стереопроекции может быть осуществлена таким же путем, как и при стереоскопической проекции на линзовый экран.

Ячейковые экраны. Практические затруднения в техническом осуществлении больших линзовых и больших зеркальных экранов породили мысль об изготовлении такого рода составных экранов, образованных из отдельных преломляющих или отражающих элементов. Такие экраны

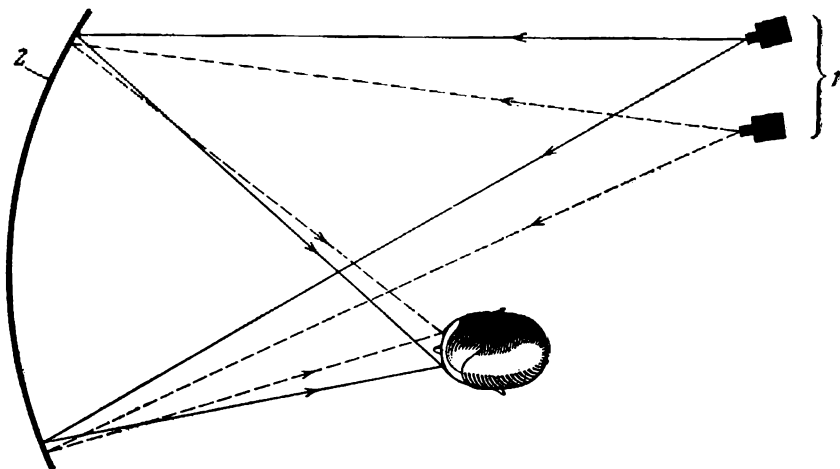


Рис. 96. Зеркальный экран:
1 — проекторы; 2 — зеркало-экран

получили название ячейковых. Возможно применение для стереоскопической проекции ячейкового экрана, составленного из набора отдельных преломляющих элементов, вместе составляющих одну большую линзу Френеля. Действие подобного экрана в принципе не отличается от действия описанного выше линзового экрана. Известны также предложения об изготовлении аналогичных зеркальных экранов, составленных из отдельных элементов.

Во избежание видимости зрителем отдельных составных элементов ячейковых экранов предлагалось либо составлять эти экраны из очень мелких элементов, не видимых зрителю, либо приводить в колебательное движение сам экран во время проектирования на него изображения.

§ 11. МНОГОСТЕРЕОПАРНОЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

При безочковом рассматривании стереоскопических изображений на сепарирующих экранах зритель должен неподвижно держать голову в зонах избирательного видения, чтобы каждый глаз видел соответствующее, ему предназначенное, изображение стереопары. Помимо неудобства, связанного для зрителя с утомительной неподвижностью, пространственный образ при стереоскопическом воспроизведении оказывается несовершенным. Он характеризуется кулисностью, и его рельеф неодинаков для зрителей, наблюдающих изображение на экране с различных местоположений.

Следовательно, для удобства наблюдения стереоскопического изображения без очков на сепарирующем экране необходимо обеспечить зрителю устойчивое стереоскопическое видение проецируемого изображения при боковых отклонениях головы в зоне шириной 200—500 мм. Предотвращение потери стереоскопического видения при таких значительных перемещениях точек наблюдения изображения зрителем возможно только в том случае, если глаза, перемещаясь в пространстве, будут последовательно попадать в зоны избирательного видения различных изображений,

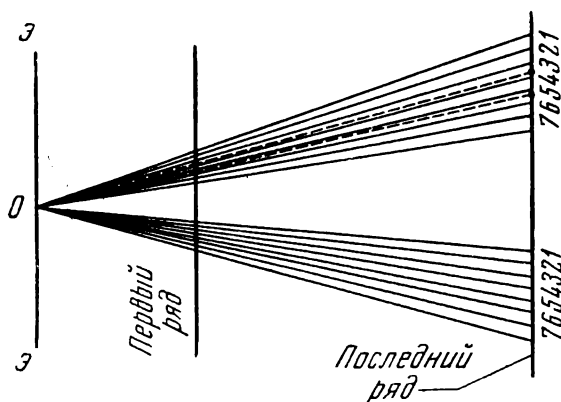


Рис. 97. Многократное повторение узкой стереоскопической панорамы (образование многостерео-парной зоны избирательного видения).

попарно составляющих друг с другом нормальные стереоскопически сопряженные изображения. Если при таком перемещении точек наблюдения стереоскопические пары изображений, видимых правым и левым глазом, будут меняться непрерывно, то мы будем иметь естественное панорамное наблюдение пространственного изображения, характеризующееся правильным рельефом без какой-либо кулиسنости.

Ограничивая задачу панорамного воспроизведения интегрального пространственного изображения,

наблюдаемого зрителем из узкой полосы пространства, можно, в известной мере, ее решить современными техническими средствами. Используя принцип сепарации радиально растрового стереоэкрана, можно получить в зрительном зале узкую полосу стереоскопической панорамы, идущей вдоль зала от центра конвергенции экрана к проекторам. В этой полосе может находиться значительное количество зрителей. Узкая полоса стереоскопической панорамы может быть многократно повторена радиально-растровым экраном в плоскости избирательного видения, следствием чего в зрительном зале будет создано большое количество повторяющихся узких полос стереоскопической панорамы, радиально расходящихся от центра конвергенции O экрана $ЭЭ$ в одной общей плоскости, как это изображено на рис. 97.

Зритель, находящийся в пределах любой полосы стереоскопической панорамы, будет видеть стереоскопическое изображение. Несколько смещая голову в ту или другую сторону, но не выходя при этом за пределы данной полосы панорамы, зритель будет оглядывать изображение с различных точек зрения, так как его глаза будут попадать в другие пары сопряженных изображений, снятых с другого базиса.

На рис. 97 цифры 1, 2, 3, 4, 5 означают центры проекций ряда изображений, снятых с различных точек зрения таким образом, что изображение, проецируемое из 2, соответствует более правой точке зрения, чем изображение, проецируемое из 1. Изображение, проецируемое из 3, более правое, чем проецируемое из 2, а изображение, проецируемое из 5, будет крайним правым.

Изображение 1 с изображением 2 составляют нормальную стереопару; изображения 2, 3 и 3, 4 также составляют друг с другом нормальные стереопары (пары изображений 1—3, 2—4 и 1—4, 1—5 и др. при этом окажутся гиперстереоскопическими).

Если один глаз зрителя, например левый, находится в зоне видения изображения 2, а правый — в зоне видения изображения 3, то зритель увидит стереоскопическое изображение в одном ракурсе. Если же зритель отклонился несколько вправо, то он попадает в зону видения другой пары сопряженных изображений 3 и 4 и увидит стереоскопическое изображение в другом аспекте. Отклоняясь влево, зритель увидит стереоскопическое изображение, соответствующее нормальной стереопаре 1 и 2. Выходя за пределы полосы стереоскопической панорамы, зритель может увидеть левым глазом изображение 5, а правым глазом — изображение 1, т. е. он увидит инвертное изображение. Чтобы избежать случаев псевдоскопического видения, можно раздвинуть зоны видения изображений 5 и 1 на расстояние, большее 65 мм, и тогда неизбежно при крайних отклонениях головы один глаз зрителя будет попадать в разрывы между зонами видения; при дальнейшем отклонении головы зритель опять начинает видеть обоими глазами, но уже сопряженные изображения другой, соседней полосы стереоскопической панорамы.

Получение ограниченной стереоскопической дискретной панорамы. Принципиально съемка ограниченной стереоскопической панорамы может производиться в виде отдельных сопряженных изображений, снятых с различных, вполне разграниченных определенными базами точек зрения, или в виде одного общего параллакс-панорамограммного изображения, которое будет составлено из вшитованных друг с другом сопряженных изображений, соответствующих непрерывному ряду точек зрения.

Дискретный ряд отдельных сопряженных стереоизображений ограниченной панорамы можно получить при помощи особых оптических приставок к объективам обычной фотоаппаратуры, а неразрывную параллакс-панорамограмму — посредством съемки объективом большего диаметра на линзово-растровую фотопленку.

Количество сопряженных стереоскопических изображений, которые могут быть размещены в площади одного нормального изображения при фото- и киносъемке, связано на практике с рядом ограничений, определяемых как условиями размещения изображений на пленке, так и условиями воспроизведения этих изображений на экране. При размещении на пленке большого числа сопряженных изображений линии, разграничивающие одно изображение от другого, вследствие своей ширины отнимают большую часть полезно используемой площади кадра. Кроме того, сильно уменьшенные размеры отдельных сопряженных изображений по сравнению с размерами нормального кадра сужают поле зрения воспроизводимого изображения. Чтобы увеличить поле зрения до нормальной ширины, требуется применять соответственно более короткофокусную съемочную оптику, а это ведет к уменьшению изображения снимаемых объектов на пленке. В этом случае для фиксации на пленке всех деталей изображения необходимо увеличить разрешающую способность оптики и пленки. В противном случае мелкие детали снимаемых объектов не смогут быть воспроизведены: они пропадут.

С другой стороны, увеличение числа сопряженных изображений в одном кадре при проекции на экран сопровождается значительными потерями света. Это происходит потому, что каждое из сопряженных изображений освещается только незначительной частью светового потока, освещающего всю площадь нормального кадра, и потому, что для обеспечения сепарации значительного числа сопряженных изображений необходимо применять растровые краны с очень малой шириной щелей. Таким образом, число сопряженных изображений, помещаемых на площади одного нормального кадра, желательно иметь возможно большим, чтобы увеличить свободу движения головы зрителя при просмотре стереоскопических картин, но возможность значительных боковых отклонений без потери

стереоскопического видения ограничивается техническими трудностями, возрастающими по мере увеличения числа сопряженных изображений. Одновременную съемку большого числа сопряженных стереоскопических изображений на одну общую пленку можно выполнить либо специальной многообъективной фотосъемочной аппаратурой, либо обычной фотографической аппаратурой со специальной оптикой.

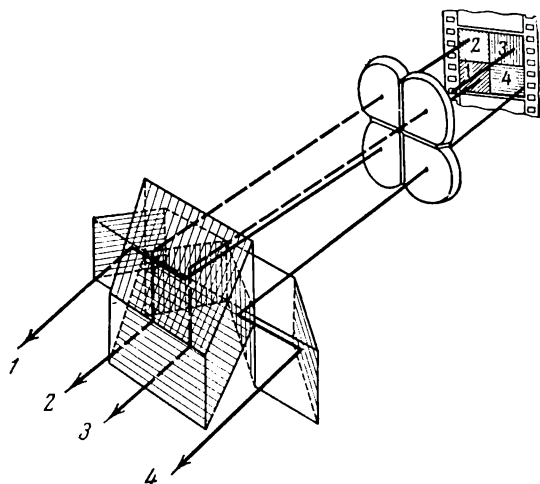


Рис. 98. Схема четырехкомпонентного полистереоскопического объектива

Оптические оси всех четырех компонентов в предметном пространстве (перед объективом) располагаются в общей (горизонтальной) плоскости, что обеспечивает одинаковое направление параллакса на всех четырех полученных изображениях.

Благодаря тому, что оптические оси лежат в одной плоскости, этот объектив можно использовать и для многостереопарной проекции изображений на радиально-растровый экран.

Некоторым практическим недостатком данной конструкции является необходимость использования в качестве оптических компонентов вполне идентичных объективов. Такая компоновка четырех светосильных объективов технически выполнима только при условии применения короткофокусных объективов. Для осуществления многостереопарной съемки можно использовать обычную фото- и киноаппаратуру с одним объективом, снабженным специальной стереонасадкой для одновременной съемки нескольких сопряженных изображений. В системах многостереопарных стереонасадок разделение изображений выполняется системой отражательных призм и зеркал. Одна из съемочных стереонасадок такого рода для съемки четырех изображений была сконструирована Б. Т. Ивановым. Автором была сконструирована и изготовлена другая симметричная зеркальная съемочная стереонасадка, оптическая схема которой представлена на рис. 99. Эта насадка была выполнена в двух вариантах: для съемки сопряженных стереоизображений, предназначенных для проекции на отражение, и для проекций на просвет, для чего требовалось последовательное размещение сопряженных изображений на пленке в обратных последовательностях, т. е. в последовательности по часовой стрелке и в последовательности против часовой стрелки. Для этого в насадке призма наружного серебрения заменялась призмой полного внутреннего отражения, имевшей в вершине угол 60° .

Принцип действия этой насадки может быть понят из рассмотрения

В качестве примера такой оптики можно привести конструкцию полицентрического объектива, разработанного в свое время автором для съемки четырех сопряженных изображений на один общий кадр фильма. Схематически устройство этого объектива показано на рис. 98. Четыре оптических компонента объектива со взаимопараллельными осями рисуют в общей фокальной плоскости четыре идентичных изображения объекта, располагаемых по четырем квадрантам кадра. С передней, входной стороны объектив снабжен призмным устройством, изламывающим ход лучей таким образом, что оп-

ее схемы. Отражательная призма (пирамида) обращена четырехгранным углом к объективу, благодаря чему объектив «видит» четыре различных изображения, пространственно разнесенных по диагонали кадра. В двух верхних гранях призмы с точки зрения объектива непосредственно видны два крайних зеркала, через которые по направлению лучей 1 и 4 виден снимаемый объект. Плоскость каждой грани призмы почти параллельна плоскости соответствующего ей зеркала; при правильной юстировке последнего эти плоскости взаимно пересекаются по оси, которая перпендикулярна к диагонали кадра, соответствующей этому изображению. Два других сопряженных изображения получаются отражением лучей 2 и 3, идущих от объекта к среднему зеркалу насадки, почти параллельно которому установлены два промежуточных зеркала, отбрасывающих эти лучи на два других промежуточных зеркала, плоскости которых почти параллельны плоскостям нижних граней призмы. Пространственное положение зеркал определяется направлением диагоналей кадра, по которым смещаются центры сопряженных изображений, полученных на кадре;

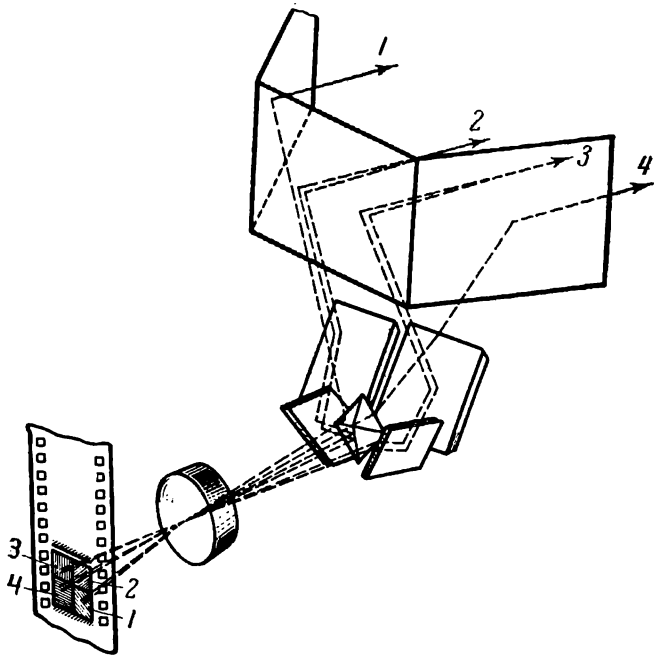


Рис. 99. Схема стереонасадки с увеличенным базисом между точками съемки четырех частичных изображений

расстояния между зеркалами рассчитаны на одинаковую компенсацию хода как средних, так и крайних лучей. Общий базис между точками зрения крайнего правого и крайнего левого сопряженных изображений для этой насадки составляет 360 мм, базис между точками зрения двух средних изображений (между лучами 2 и 3) выбран равным 60 мм, а между точками зрения 1-го и 2-го изображений, а также 3-го и 4-го изображений выбран в 2,5 раза больше, т. е. по 150 мм. Это сделано, чтобы обеспечить зрителю при нормальном положении головы стереоскопическое видение с нормальным базисом, а при наклонах головы в ту или другую сторону — несколько утрированное боковое оглядывание рассматриваемого объекта с подчеркнутой гиперстереоскопией.

§ 12. ПРОЕКЦИОННОЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Интегральное изображение, создающее эффект пространственной панорамы, как мы видели, создается пучками лучей, выходящих из отдельных линз растрового интегрального диапозитива. Совокупность элементарных изображений объекта на таком диапозитиве можно назвать панорамограммой по аналогии с названием стереограмма тех частичных изображений, из которых синтезируется обычное стереоскопическое изображение.

Каждое из элементарных изображений панорамогаммы отличается от других элементарных изображений пространственным параллаксом. Обычно при рассматривании пространственной картины глаза зрителей находятся на одном горизонтальном уровне, а поэтому существенны для получения стереоскопического восприятия только различия элементарных изображений, обусловленные горизонтальными параллаксами. Ограничивая панорамогамму интегрального изображения набором

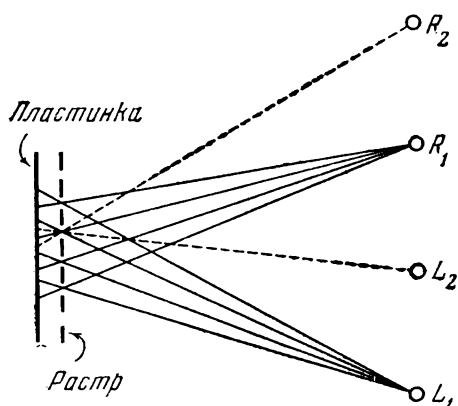


Рис. 100. Схема рассматривания различных аспектов изображения параллакс-панорамогаммы через щелевой растр

одних лишь элементарных изображений с горизонтальными параллаксами, можно значительно упростить техническое осуществление репродукции интегрального изображения. Одним из способов такого упрощенного воспроизведения интегрального изображения является синтезирование его посредством параллельно-линейного растра с щелевыми или цилиндрическими линзовыми элементами.

При воспроизведении стереоскопического изображения с помощью параллельно-линейного растра, например методом автостереоскопии, стереограмма представляется в виде узких чередующихся полосок правого и левого частичного изображения. Изображение, получаемое за ще-

лями или цилиндрическими линзами растра при воспроизведении интегрального изображения, представляется из полосок частичных изображений, отличающихся непрерывно изменяющимся параллаксом, т. е. отдельные линии вдоль полоски соответствуют как бы изображениям объекта, запечатленным с отдельной точки зрения, а смежные линии в этой полоске соответствуют частичным изображениям объекта, наблюдаемого с несколько сдвинутой в горизонтальном направлении точки зрения. Такая панорамогамма только с горизонтальными параллаксами частичных изображений получила название параллакс-панорамогаммы.

Параллакс-панорамогамма может представлять собой зафиксированными отдельные частичные изображения воспроизводимого объекта, видимые с различных точек зрения, расположенных по горизонтали в виде непрерывного ряда либо в виде дискретного ряда положений. В первом случае параллакс-панорамогамма позволяет воспроизвести непрерывную пространственную панораму объекта, а во втором случае панораму — ограниченную дискретными точками наблюдения. По существу, параллакс-панорамогаммное воспроизведение интегральных изображений можно рассматривать в качестве дальнейшего развития растрового метода воспроизведения стереоскопических изображений, при котором вместо двух частичных изображений стереограммы воспроизводится большое количество частичных изображений, составляющих стереограмму с непрерывно изменяющимся по параллаксу рядом изображений. Принцип получения пространственного изображения может быть легко уяснен из рассмотрения рис. 100, на котором представлена параллаксная панорамогамма с очень узкими щелями. Наблюдая параллакс-панорамогамму сквозь щели растра правым и левым глазом, зритель увидит каждым глазом разные изображения, составляющие стереопары, вследствие чего будет синтезирована пространственная картина. При отклонении в новое положение, обозначенное на рисунке прерывистыми прямыми, зритель снова увидит правым и левым глазом два новых сопряженных

изображения, т. е. опять будет видеть стереоскопическую картину, но уже в несколько другом аспекте, с другой точки зрения.

Делая щель в растровой решетке очень узкой (например, порядка $\frac{1}{50}$ ширины непрозрачных линий растра) или заменяя щели линзовым растром, можно создать большое количество точек рассматривания, в каждой из которых глаз зрителя будет видеть различные изображения. Параллаксная панорамограмма может быть получена путем фотогра-

фирования через растровую решетку, непосредственно наложенную на эмульсионный слой фотографической пластинки. При этом для получения полосок панорамограммы, соответствующей различным точкам зрения, объектив или вся съемочная камера должны последовательно перемещаться в ряд положений, соответствующих этим точкам зрения. При каждой экспозиции частичного изображения панорамограммы с новой точки зрения необходимо, чтобы полосы одного изображения не налагались на

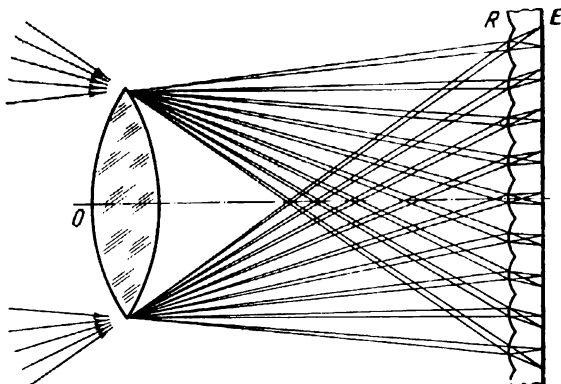


Рис. 101. Получение параллакс-панорамограммы через линзовый растр при помощи объектива большого диаметра

полоски другого, а располагались рядом, для чего нужно передвигать растр или фотографическую пластинку друг относительно друга на ширину щели растра. Таким образом, путем последовательных экспозиций может быть получена параллакс-панорамограмма.

Параллакс-панорамограмму можно получить и путем одновременной экспозиции всех частичных изображений. В этом случае с большего числа различных точек зрения, расположенных на одной горизонтали, одновременно рядом фотографических камер можно было бы сделать несколько снимков на фотопластинки, прикрытые идентичными растрами с узкими щелями. Полученные негативы частичных изображений панорамограммы надо контактно скопировать на общий диапозитив со сдвигом растровых полос с таким расчетом, чтобы полосы одного изображения без наложения укладывались рядом с полосами других сопряженных изображений панорамограммы в последовательном порядке.

Получение параллакс-панорамограммы за одну экспозицию практически более просто может быть осуществлено и при помощи одной фотографической камеры, без каких-либо перемещений ее. Только в этом случае фотографирование панорамограммы должно производиться объективом с большой апертурой через линзовую растровую решетку, установленную перед фотографической пластинкой на некотором расстоянии, как показано на рис. 101.

Вместо объектива большой апертуры для получения параллаксной панорамограммы можно использовать также большое вогнутое зеркало.

Проекция ограниченной стереоскопической панорамы на радиальном линзово-растровом экране. Воспроизведение ограниченной стереоскопической панорамы требует создания для зрителей условий избирательного видения правым и левым глазом соответственных сопряженных изображений, составляющих нормальную стереопару. Для достижения такого воспроизведения могут применяться растровые стереоэкраны, как параллельно-растровые, так и радиально-растровые. Использовать щелевые растры для воспроизведения ограниченной стереоскопической панорамы

невозможно. В данном случае применимы только светосильные линзово-растровые стереоэкраны, обладающие большой емкостью. Для проекции ограниченной стереоскопической панорамы, например, может быть использована пленка с линзовым растром, на которую предварительно производится съемка интегрального изображения через объектив большого диаметра. Этот способ стереоскопического воспроизведения обеспечивает бинокулярное стереоскопическое видение, допускающее как боковое,

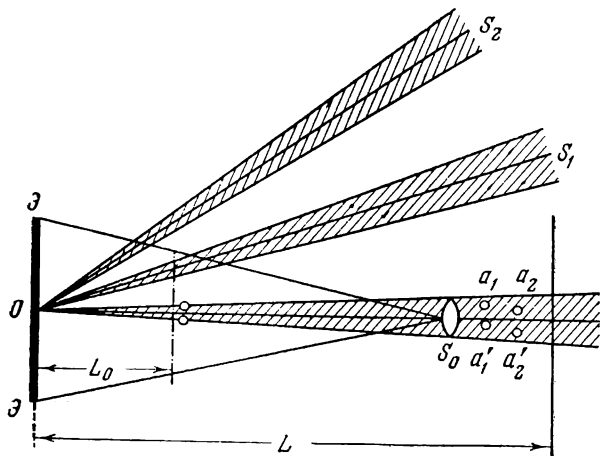


Рис. 102. Схема образования интегральных зон избирательного видения при проекции параллакс-панорамы на радиально-растровый стереоэкран

так и осевое отклонение головы зрителя при рассматривании картины. При боковых отклонениях головы зритель увидит изображенные предметы как бы с разных точек зрения, а при осевом перемещении головы он ощущает некоторое изменение угловой величины изображенных предметов.

Проецирование изображения с линзово-растровой пленки на экран может производиться обычным проектором, как изображено на рис. 102. Помещая проектор перед экраном ЭЭ в любой произвольно выбранной в пространстве

точке S_0 и соединяя центр объектива с точкой конвергенции растровых полос O , получим прямую OS_0 , являющуюся осью конуса зоны избирательного видения изображения. Из точки O расходится пучок подобных конусов избирательного видения с осями OS_1 , OS_2 , и т. д. Глаз зрителя, помещенный в какую-либо точку внутри конуса зоны избирательного видения, например в точку a'_1 , увидит изображение на экране сквозь все линзовые элементы раstra. Однако при горизонтальном перемещении глаза внутри конуса нормально к оси конуса глаз увидит изображение на экране, соответствующее уже другой точке зрения, т. е. при перемещении глаза в точку a_1 глаз увидит изображение на экране, отличающееся от прежнего объемным параллаксом.

Если различие изображений, видимых из точки a'_1 и точки a_1 , соответствует изображениям, различающимся нормальным стереобазисом, то зритель, у которого правый глаз находится в точке a_1 , а левый глаз — в точке a'_1 , увидит нормальное стереоскопическое изображение. При поперечных отклонениях головы, например, в положение, когда глаза будут находиться в точках a_2 и a'_2 , зритель увидит стереоскопическое изображение с тем же стереобазисом, однако уже несколько с другой точки зрения, т. е. так же, как это можно было бы увидеть, отклоняя голову при рассматривании действительного предмета в натуре. Таким образом, зритель, отклоняя в известных пределах голову, будет иметь возможность как бы заглядывать за предметы несколько сбоку.

При перемещениях головы вдоль линии избирательного видения к экрану, до некоторого расстояния от экрана L_0 , оба глаза зрителя не выходят из конуса избирательного видения. Но при этом, во-первых, ограничиваются допустимые поперечные отклонения головы зрителя, а во-

вторых, увеличивается стереобазис между изображениями, видимыми правым и левым глазом. При удалении зрителя от экрана допускаемые поперечные отклонения головы увеличиваются, а стереобазис, отличающий правое и левое изображения, уменьшается. То обстоятельство, что стереобазис для зрителей, находящихся ближе к экрану, больше, а для зрителей, удаленных от экрана, меньше, создает для сидящих ближе к экрану иллюзию уменьшения видимых размеров изображения, а находящихся дальше от экрана впечатление некоторого увеличения размеров изображения. Все вместе это приводит к более естественному восприятию рельефа пространственного изображения.

Здесь следует заметить, что проекция на радиально-растровый экран непрерывной панорамы расширяет допустимые перемещения головы зрителя по сравнению с обычной проекцией двух сопряженных стереоизображений не только в плоскости избирательного видения, но также и по высоте. Поднимая или опуская голову, в данном случае зритель будет видеть различные участки изображения на экране по ширине, но не с одинаковых точек зрения съемочного объектива, т. е., иными словами, различные участки экрана зрителем будут рассматриваться с различными стереобазисами. Однако такое рассматривание пространственного изображения не должно нарушить стереоскопического восприятия.

Чтобы структура линзового раstra не мешала восприятию пространственной картины, элементы его должны иметь достаточно малые размеры, лежащие за пределами различимости их глазами зрителей.

Глава IV

СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ ФОТОГРАФИЯ И СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ ПЕЧАТЬ

§1. Общие принципы получения стереоскопических фотографий. §2. Стереоскопическая съемка однообъективными фотокамерами со стереонасадками. §3. Двухобъективные стереофотоаппараты. §4. Фотографическая печать стереоскопических снимков. §5. Полиграфическая печать стереоскопических изображений. §6. Изготовление стереоскопических отпечатков в виде вектографов. §7. Изготовление автостереоскопических фотографий на линаво-растровой пленке. §8. Получение панорамно-стереоскопических фотографий на линаво-растровой пленке. §9. Изготовление цветных стереоскопических фотографий.

§ 1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОЛУЧЕНИЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ФОТОГРАФИЙ

Стереоскопическая фотография появилась почти одновременно с обыкновенной фотографией около ста лет назад. За время своего существования она нашла широкое применение, как новое изобразительное средство в различных областях науки и техники: в картографии, при аэросъемке, при микросъемке, в рентгеносъемке, для документального сохранения и воспроизведения изображения архитектурных памятников и скульптуры, для изготовления наглядных учебных пособий и многих других целей. Стереоскопическая фотография получила распространение и среди любителей-фотографов в качестве нового художественного средства изобразительного искусства (листы XII—XIII).

Для съемки стереоскопических фотографий существует много различных специальных фотоаппаратов, но съемка может осуществляться и при помощи обычных фотографических камер. При съемке обычными фотоаппаратами требуется применение специальной оптической насадки, устанавливаемой перед объективом камеры, которая обеспечивает фотографирование предмета в двух видах, представляющих соответственно сопряженные изображения стереограммы. Стереоскопическая съемка может быть выполнена и без оптической насадки, но тогда она производится путем двукратного экспонирования фотографируемого предмета с двух разных точек зрения. Рассмотрим несколько подробнее, как выполняются такого рода съемки.

Стереоскопическое фотографирование обычными однообъективными фотокамерами. Простейший способ стереоскопического фотографирования состоит в том, что сначала предмет фотографируется аппаратом, установленным в одном положении на первую пластинку, затем его перемещают на некоторое расстояние по горизонтали вправо или влево от оптической оси и из этого положения делают другой снимок предмета на вторую пластинку. Полученные снимки представляют собой сопряженные изображения стереограммы предмета. Такой метод фотографирования можно применять только для съемки неподвижных объектов, архитектурных сооружений, скульптуры и т. п.

Передвигая фотоаппарат на разные расстояния, можно производить стереоскопическую съемку соответственно с различными базами, что представляет иногда практический интерес. Так, съемка с увеличенным базисом целесообразна при фотографировании удаленных объектов, например, при съемке горных ландшафтов. На рис. 103 приведен график для определения величины базисов в зависимости от удаленности снимаемых объектов.

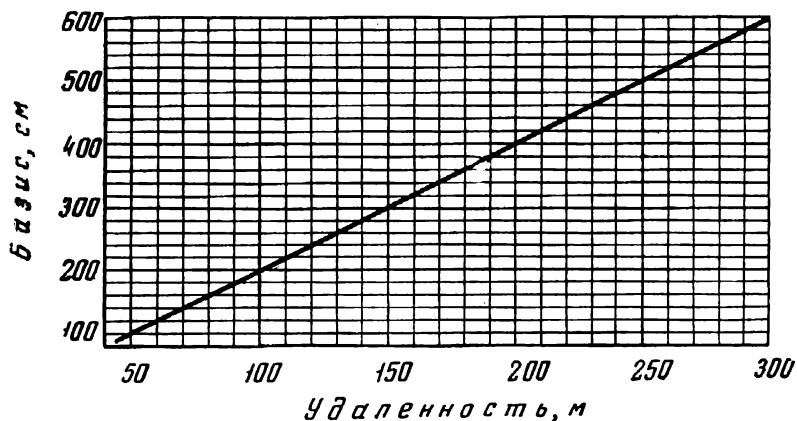


Рис. 103. Рекомендуемая величина съемочного базиса в зависимости от удаленности снимаемого объекта

Для удобства выполнения стереоскопической съемки обычной фотокамерой применяются особые приспособления, с помощью которых легко передвигать камеру на заданный базис из одного положения в другое. Эти приспособления позволяют сдвигать камеру в горизонтальном направлении так, что оптическая ось объектива остается параллельной самой себе. При таких сдвигах сохраняются в поле зрения объективов только достаточно удаленные объекты.

При съемке же небольших предметов, фотографирование которых должно производиться с близких расстояний, перемещение камеры в другое положение обычно сопровождается ее поворотом, чтобы изображение фотографируемого предмета не вышло за пределы поля зрения объектива. Однако такой поворот приводит к получению нежелательных искажений изображения на стереограмме.

Рассмотрим причину, вызывающую эти искажения. На рис. 104 показана схема последовательного фотографирования объекта AB из двух положений фотокамеры с поворотом оптической оси объектива на центральную часть объекта. В левом положении фотокамеры, когда центр объектива находится в точке O_1 , левый, более близкий край объекта A будет фокусироваться объективом на большем удалении за фокусом в положении a' , чем правый край объекта B , изображение которого будет получаться в положении b' .

Таким образом, можно заметить, что масштаб изображения правого и левого краев предмета получается в фокальной плоскости объектива разным.

Из чертежа (рис. 104) видно, что

$$\frac{a'O_1}{O_1A} > \frac{b'O_1}{O_1B}.$$

Следовательно, левый край объекта будет снят в более крупном масштабе, чем его правый край.

Посмотрим теперь, как изобразится объект на снимке, сделанном фотокамерой в правом положении, когда объектив находится в точке O_2 . В данном случае из чертежа следует, что

$$\frac{a''O_2}{O_2A} < \frac{b''O_2}{O_2B},$$

т. е. на правом снимке масштаб изображения левого края объекта оказывается меньшим, чем масштаб правого края. Следовательно, если бы мы фотографировали таким образом прямоугольник, то он получился бы на обоих снимках в виде несходственных трапеций. Одни и те же части поля зрения на правом и левом снимках стереограммы получают противоположные искажения. Получающиеся несоответствия правого и левого изображений стереограммы вследствие появления значительных вертикальных параллаксов между сходственными точками правого и левого изображений на краю поля зрения затрудняют стереоскопическое рассматривание таких снимков. Избежать возникновения вертикальных параллаксов на сопряженных изображениях стереограммы можно только при съемке правого

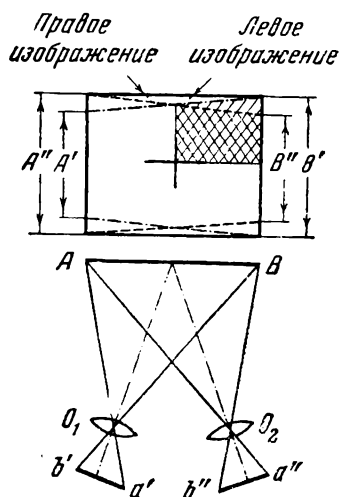


Рис. 104. Схема фотографирования с двух точек зрения и поворотом оптической оси объектива на центр предмета

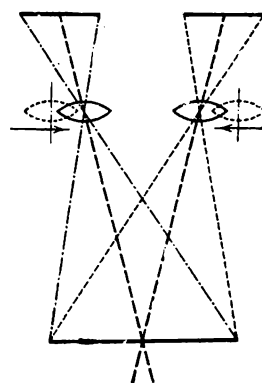


Рис. 105. Кадрирование изображения близкого предмета на правом и левом снимках стереограммы параллельным сдвигом объектива (без вращения оптической оси)

и левого изображений стереограммы из двух положений фотокамеры, при которых оптические оси объектива сохраняются параллельными самим себе (и, конечно, нормальными к плоскости фотопластины). В этом случае при съемке близких объектов, чтобы получать изображения в поле кадра, приходится сдвигать объектив параллельно пластинке в направлении, уменьшающем съемочный базис, не допуская при этом вращения оптической оси объектива (рис. 105).

Если камера представляет собой жесткую конструкцию, в которой нельзя смещать объектив параллельно фокальной плоскости, то изображения близких объектов при съемке в левом и правом положениях фотокамеры будут соответственно смещаться за левый и правый края кадра. Поэтому такой фотокамерой можно производить стереоскопическую съемку не слишком с близких расстояний, используя впоследствии

для составления стереограммы только сходственные части правого и левого снимков.

Параллельное перемещение фотокамеры на требуемое расстояние можно осуществить, установив камеру на ползунке, движущемся по линейке, укрепленной на штативе.

Иногда для этой цели делают более удобное приспособление в виде перекидного кронштейна. В случае необходимости и отсутствия под рукой каких-либо приспособлений стереоскопическую съемку можно выполнить любой малоформатной фотокамерой («Зоркий», «Зенит», «Киев» и др.) с рук, делая две кратковременные экспозиции (не более $\frac{1}{25}$ сек.) с двух позиций. Обычно такую съемку рекомендуют делать, наблюдая за снимаемым объектом через видоискатель фотоаппарата, сначала опираясь всем корпусом на левую ногу, а затем, делая второй снимок, переступив с левой ноги на правую. При таком перемещении корпуса точка визирования объекта обычно перемещается на расстояние, близкое к величине нормального стереобазиса. Первый снимок в этом случае дает левое изображение, а второй — правое изображение стереограммы.

При съемке небольших предметов, которые обычно рассматриваются с близких расстояний сильно конвергированными осями глаз, можно производить фотографирование стереограммы, поворачивая фотокамеру вокруг предмета. Хотя в этом случае сопряженные изображения стереограммы и будут несколько искажены, но при рассматривании их также с близкого расстояния через стереоскоп создаются условия, мало отличающиеся от естественного наблюдения этого предмета.

При выполнении съемки обычной фотокамерой частичные изображения стереограммы, как мы заметили, получаются на двух отдельных пластинках. Однако в случае применения специальных к а ш е т, вкладываемых в кассету перед фотографической пластинкой, можно получать оба изображения стереограммы на одной пластинке. Применяемая в этом случае кашета представляет собой непрозрачную пластинку, в которой сделан вырез в виде окошка, открывающего одну половину фотопластинки. После экспонирования первого изображения на фотопластинке, кашета выдвигается из кассеты и вкладывается обратно другой стороной, открывающей другую половину фотопластинки, на которую экспонируется второе частичное изображение стереограммы.

Применение однообъективных фотографических аппаратов для стереоскопической съемки — в ряде случаев весьма удобное техническое средство, дающее хорошие результаты. Можно указать, например, что выполнение стереоскопической аэросъемки в принципе основывается на повторном экспонировании одного и того же участка местности однообъективной камерой. В этом случае стереоскопический базис между двумя парными снимками определяется тем расстоянием, которое пролетит самолет за промежуток времени между съемкой первого и второго изображений.

В некоторых случаях при выполнении стереоскопической съемки однообъективной камерой бывает выгоднее несколько повернуть снимаемый объект перед объективом камеры, вместо того чтобы передвигать всю камеру вокруг этого объекта. Такого рода снимки можно делать только в том случае, если за фотографируемым объектом вблизи расположен сплошной фон, загораживающий видимость удаленных планов.

Хотя описанные выше приемы стереосъемки обычными однообъективными фотоаппаратами довольно просты, они требуют все же большой затраты времени для тщательной установки аппарата и выполнения всех манипуляций, связанных с проведением двух экспозиций. Поэтому практически значительно удобнее выполнять стереоскопические съемки однообъективными камерами, снабженными специальными насадками, позволяющими получать два частичных изображения стереограммы на фотопленку одновременно.

§ 2. СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ СЪЕМКА ОДНООБЪЕКТИВНЫМИ ФОТОКАМЕРАМИ СО СТЕРЕОНАСАДКАМИ

Получение двух изображений одного и того же предмета может быть достигнуто с помощью различных оптических устройств. Самым простым из них являются два зеркала, поставленные под небольшим углом друг к другу перед съемочным объективом, как это показано на рис. 106. Если смотреть в такие зеркала с того места, где расположена фотокамера, то можно увидеть в каждом из них «свое» изображение фотографируемого

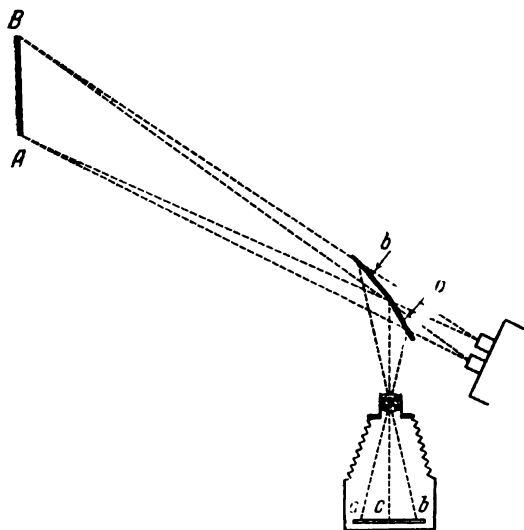


Рис. 106. Двухзеркальная стереонасадка к однообъективной фотокамере

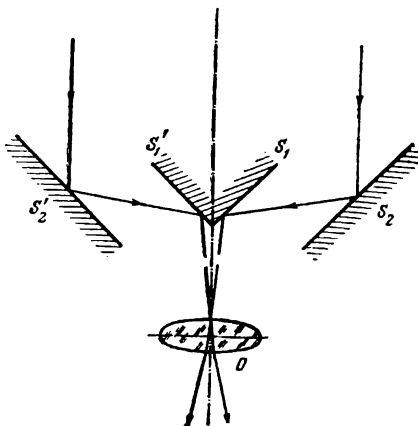


Рис. 107. Четырехзеркальная симметрическая стереонасадка

предмета. При внимательном наблюдении этих изображений можно заметить, что они несколько различаются. Такое различие изображений происходит вследствие того, что мы рассматриваем предмет через каждое зеркало как бы со своей точки зрения. Эти точки зрения могут быть легко определены путем геометрического построения, показывающего ход лучей от снимаемого предмета к объективу фотокамеры. На рисунке показан ход крайних лучей от снимаемого предмета к объективу камеры через оба зеркала. Нетрудно заметить, что лучи от предмета, идущие к каждому зеркалу, как бы сходятся в точках, где расположены мнимые изображения объектива камеры. Расстояние между этими изображениями объективов в зеркале и составляет стереоскопический базис, определяющий параллаксы изображений, снимаемых через зеркала.

Устройство из двух зеркал, помещенных перед объективом фотокамеры позволяет снять оба сопряженных изображения стереограммы одновременно. При практическом осуществлении съемки приходится применять зеркала наружного серебрения, чтобы предотвратить получение двойных контуров изображения, даваемых обычными зеркалами. Из рассматриваемой схемы видно, что съемка выполняется под углом к направлению, в котором расположен предмет. Чтобы сделать более удобным наблюдение фотографируемого предмета во время съемки, оптическое устройство из двух зеркал может быть дополнено третьим зеркалом, устанавливаемым на пути хода лучей так, чтобы его плоскость была почти параллельна плоскостям основных зеркал. Такая стереонасадка позволяет выполнять прямую съемку.

Стереоскопические насадки из двух и трех зеркал применялись для съемки и проекции первых стереоскопических кинофильмов. Недостатком их было то, что они давали несколько искаженные изображения. Эти искажения происходят вследствие поворота обеими зеркалами оптической оси съемочного объектива на разные углы, что приводит к тому, что видимое поле зрения вместо прямоугольного на каждом из снимков представляется в виде трапеций, как это было представлено на рис. 104. Искажения

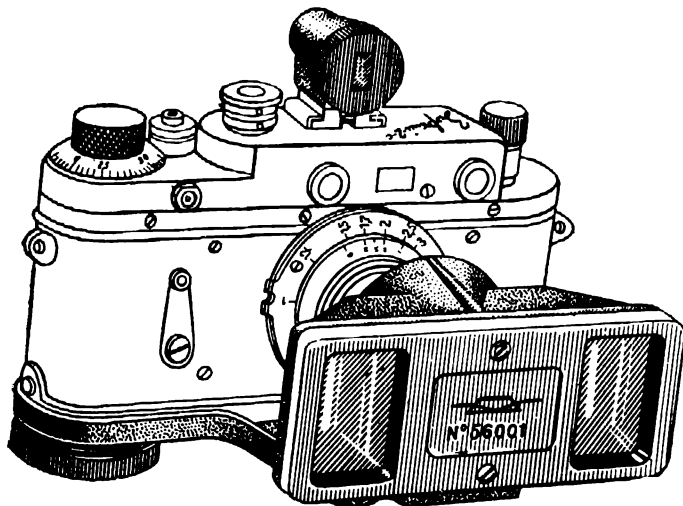


Рис. 108. Призматическая стереонасадка, укрепленная на фотоаппарате «Зоркий 2-с»

в значительной мере могут быть устранены на окончательной стереограмме в случае проекционной печати или при проекции сфотографированных таким образом изображений на экран через аналогичные зеркальные стереонасадки, которые автоматически восстанавливают правильные геометрические формы изображений.

Помимо двух- и трехзеркальных стереонасадок, известно применение стереонасадок с большим числом зеркал. Для выполнения прямой съемки (не под углом) применяется четырехзеркальная симметричная стереонасадка, схема которой изображена на рис. 107. Такая насадка представляет собой два больших зеркала наружного серебрения, поставленных в вертикальной плоскости под углом 45° к оптической оси объектива, между которыми располагаются два меньших зеркала; плоскость одного из этих зеркал параллельна плоскости правого большого зеркала, а плоскость другого зеркала параллельна плоскости левого большого зеркала. Ход лучей от предмета через зеркала к объективу камеры показан на рисунке стрелками. Изменяя угол между крайними зеркалами, но не трогая малых зеркал, можно на фотографической пластинке получать два изображения снимаемого объекта, раздвинутых на соответствующее расстояние. Вместо зеркал в стереонасадках могут быть использованы призмы полного внутреннего отражения. Конструкции, в которых зеркала заменены призмами полного внутреннего отражения, получили большое распространение в качестве стереоскопических насадок к малоформатным фотоаппаратам типа «Зоркий», «Лейка» и др.

На рис. 108 показана одна из призматических стереонасадок, укрепленная на фотоаппарате «Зоркий 2-с». Стереоскопические насадки, выпускаемые отечественной промышленностью, предназначены для совместного применения с малоформатными фотокамерами «Зоркий» и «Киев»

при производстве съемок объективами типа «Индустар-22» или «Индустар-50» (фокусное расстояние равно 5 см и относительное отверстие не более 1/3,5). Эти насадки позволяют снимать объекты, расположенные не ближе 1,5 м.

Только при вполне определенном фокусном расстоянии объектива, на которое рассчитана данная насадка, она обеспечивает нормальное расположение каждого из сопряженных изображений стереограммы на половине площади обычного кадра данного аппарата. Указанные выше насадки дают на площади стандартного кадра малоформатных камер 24×36 мм

два изображения стереограммы, каждое размером 16×23 мм.

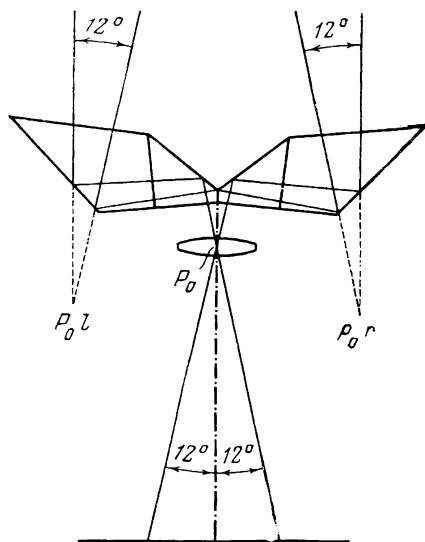


Рис. 109. Ход лучей через призматическую стереонасадку

Оптическая схема и ход лучей в призматической стереонасадке показана на рис. 109. Как видно из рисунка, оптическая система стереонасадки состоит из двух одинаковых, симметрично расположенных призм, отклоняющих лучи так, что изображение входного зрачка объектива P_0 переносится правой призмой в положение P_0r , а левой призмой — в положение P_0l . Расстояние между мнимыми изображениями входных зрачков объектива P_0r и P_0l определяет величину съемочного базиса, получаемого с данной насадкой. Обычно у стереонасадок, предназначенных для малоформатных фотоаппаратов, съемочный базис составляет 35 мм. Из схемы не трудно заметить, что полезный угол по ширине поля зрения при съемке через стереонасадку уменьшается вдвое по сравнению

с углом зрения применяемого съемочного объектива. Поэтому при стереоскопической фотосъемке с помощью стереонасадки для определения границ фотографируемого поля необходимо пользоваться специальным видоискателем, поле зрения которого соответствует полю зрения стереонасадки. Обычно такой видоискатель, как это показано на рис. 108, укрепляется сверху на корпусе фотокамеры.

Надо иметь в виду, что пользование при съемке более светосильными объективами, чем светосила, на которую рассчитана данная насадка, не может быть эффективным, так как оптическая система насадки в этом случае будет виньетировать световые пучки. Вообще же для получения снимков, дающих хороший стереоскопический эффект, необходимо снимать изображения стереограммы с большой глубиной резкости, а этого можно достичь при возможно большем диафрагмировании съемочного объектива. Для больших фотокамер применение призмённых стереонасадок представляет затруднение из-за их большого веса, и поэтому в таких камерах обычно употребляются только зеркальные насадки, а призмы полного внутреннего отражения ставятся лишь взамен центральных зеркал. При съемке однообъективной фотокамерой для получения двух частичных изображений стереограммы вместо насадок с отражающими оптическими элементами могут быть применены насадки с преломляющими элементами, в качестве которых, например, служит, двойной апохроматический клин. Оптический клин, устанавливаемый перед объективом фотографической камеры, отклоняет лучи к своему основанию и таким образом раздваивает изображение, рисуемое в фокальной плоскости

объектива. Однако применение оптического клина связано с неудобствами, вызываемыми его громоздкостью, а также с некоторыми искажениями, вносимыми им в изображения, так как его ахроматизация предотвращает только устранение хроматической аберрации, не устраняя астигматизма, дисторсии и др.

Стереоскопическая съемка двумя фотокамерами. Одновременное экспонирование двух частичных изображений стереограммы может быть выполнено двумя обычными фотографическими аппаратами, устанавливаемыми на некотором расстоянии, определяющем съемочный базис. Такие фотокамеры могут применяться для съемки не только неподвижных предметов, но также и движущихся. В последнем случае камеры должны иметь автоматическое устройство, позволяющее приводить в действие затворы обеих камер одновременно. Что же касается регулировки диафрагмы, то она точно так же, как и фокусировка объектива у каждой камеры, может выполняться самостоятельно. Однако несложно сделать приспособление, шарнирно связывающее механизмы наводки на фокус и соответственно механизмы установки диафрагмы в обеих камерах. Выполнение съемки двумя связанными друг с другом обычными фотокамерами не представляет каких-либо преимуществ перед съемкой нормальным двухобъективным стереофотоаппаратом, за исключением лишь того, что в данном случае можно более просто изменять стереобазис при съемке.

Такое изменение стереобазиса очень полезно при съемке удаленных предметов. Особенно большое значение это имеет при съемке движущихся удаленных объектов, как например для стереоскопической съемки облаков, полета птиц и в других случаях. Съемка двумя камерами, удаленными друг от друга на значительное расстояние, — практически единственный способ для получения такого рода стереоскопических изображений.

§ 3. ДВУХОБЪЕКТИВНЫЕ СТЕРЕОФОТОАППАРАТЫ

[В настоящее время известно большое число различных типов специальных фотоаппаратов, предназначенных для стереоскопической съемки. Такие аппараты снабжены двумя объективами, рисующими два сопряженных изображения стереограммы снимаемого объекта на общей пластинке или на пленке, и рассчитаны на применение пластинок различных форматов или пленок.] Принципиальная схема простого стереоскопического фотоаппарата с двумя объективами, снимающего изображение на фотопластинку, показана на рис. 110. Ящичная камера разгорожена светопроницаемой перегородкой на два отсека, каждый из которых снабжен своим объективом с общим затвором, позволяющим открывать одновременно оба объектива. В свое время широко распространенным стереофотоаппаратом была камера, известная под названием «Глифоскоп». Эта камера имеет съемную крышку, на которой смонтированы фотографические объективы с затворами и регулируемые диафрагмы. При снятии крышки камера превращается в стереоскоп, позволяющий рассматривать полученные стереограммы на просвет. В этом случае диапозитивные отпечатки стереограммы вставляются вместо кассеты на место крышки аппарата.

Более совершенным стереоаппаратом, довольно распространенным у нас, была камера, известная под названием «Вераскоп». Она снабжена особой кассетой с 12 фотопластинками размером 45×107 мм, позволяющей автоматически сменять пластинки после каждой экспозиции. Камера снабжена видоискателем и специальным зеркалом для наводки на фокус. Современные модели «Вераскопа» имеют объективы с относительным отверстием до $1:4,5$ при фокусном расстоянии, равном 54 мм. Вместо плас-

тиночного ящика камера может снабжаться адаптером, позволяющим производить съемку на пленку.

В последнее время большое распространение получили стереофотокамеры, специально предназначенные для съемки на фотопленку. Широкой популярностью среди фотолюбителей пользуются стереоскопические фотоаппараты, в которых для съемки применяется 35-мм кинопленка. Обычно в таких аппаратах получают снимки стереограммы в виде двух кадров стандартного размера 24×24 мм, позволяющие печатать изображения с помо-

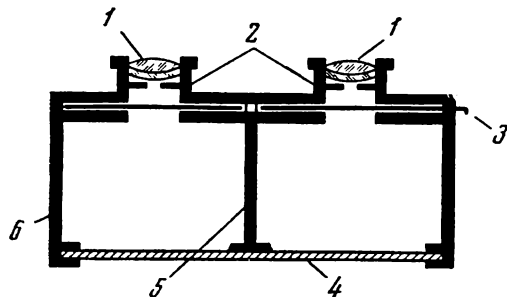


Рис. 110. Принципиальная схема двухобъективной стереофотокамеры для съемки на пластинки:

1 — объективы; 2 — диафрагмы; 3 — затвор; 4 — пластинка или матовое стекло; 5 — перегородка; 6 — корпус камеры

щью обычных фотоувеличителей, применяемых для печати малоформатных кадров. Сопряженные изображения, составляющие стереограмму, на 35-мм пленке обычно размещаются через один или два кадра (рис. 111),

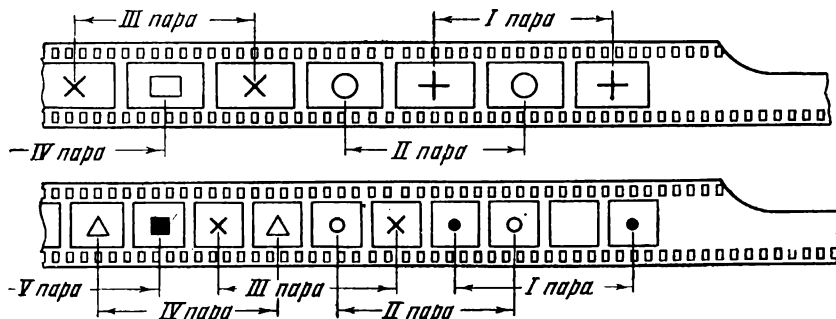


Рис. 111. Обычное расположение пар стереоскопических снимков на 35-мм пленке

так что между осями правого и левого изображений образуется расстояние, приблизительно равное нормальному стереобазису.

Одним из образцов стереофотоаппаратов подобного рода, снимающего на 35-мм кинопленку, является аппарат «Belplasca», представленный на рис. 112. У последних образцов аппаратов такого типа имеются синхроконтракты, позволяющие производить стереоскопическое фотографирование объекта при свете ламп-вспышек.

В настоящее время у нас получил наиболее широкое применение стереоскопический фотоаппарат «Спутник», выпускаемый отечественной промышленностью (рис. 113). Это тоже пленочный аппарат, снимающий на

роликовую фотопленку шириной 6 см. Размер получаемой стереограммы 6×13 см с форматом каждого сопряженного изображения 6×6 см. Фотокамера снабжена двумя съемочными объективами, имеющими фокусное расстояние 7,5 см и относительное отверстие $1:4,5$. Расстояние между осями объективов, составляющее съемочный базис, равно 65 мм.

Камера имеет зеркальный видоискатель со светосильным объективом, расположенным между основными съемочными объективами. Относительное отверстие этого объектива $1:2,8$, обеспечивая

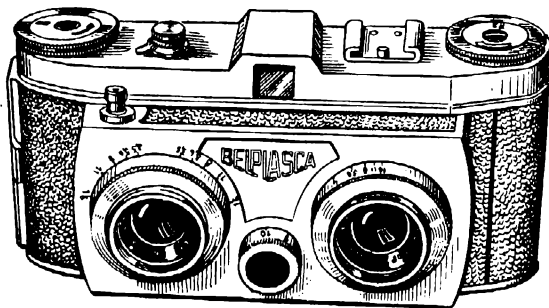


Рис. 112. Малоформатная пленочная стереофотокамера «Belplasca»

по матовому стеклу, имеющемуся в средней части поля зрения видоискателя, наводит камеру на фокус. Вращением оправы объектива видоискателя (одновременно с наводкой на резкость визируемого изображения по матовому стеклу) производится автоматическая наводка на фокус обоих съемочных объективов. Минимальное расстояние, на котором допустима стереоскопическая съемка с правильным кадрированием изображений стереограммы, составляет 1,3 м. Объективы камеры имеют совместно действующие центральные затворы, позволяющие производить съемку с автоматическими выдержками в $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{50}$, $\frac{1}{25}$, $\frac{1}{10}$ сек и с длительной выдержкой, регулируемой от руки. Установка выдержки производится поворотом регулировочного кольца правого объектива. Камера снабжена механизмом автоспуска и имеет синхроконттакт, позволяющий пользоваться как одноразовыми лампами-вспышками, так и электронными импульсными лампами-вспышками.

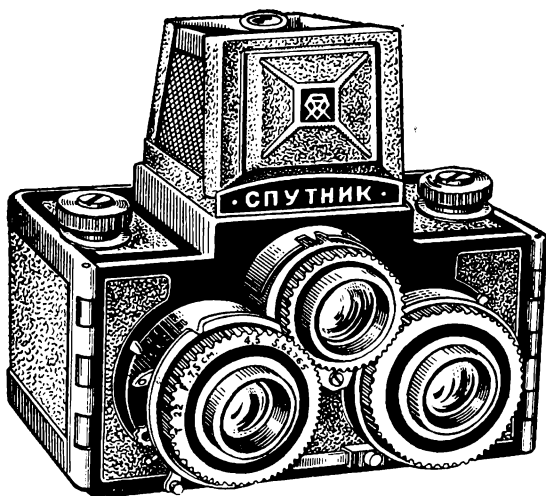


Рис. 113. Отечественная стереофотокамера «Спутник»

Из специальных стереоскопических фотокамер следует упомянуть о зеркальной стереофотокамере, позволяющей при съемке следить за фотографированным объектом по изображению, рисуемому объективами камеры на матовом стекле, находящемся в верхней крышке. Лучи света, выходящие из объективов, попадают на косо расположенные в камере зеркала, отражающие их к матовому стеклу. Получаемая на матовом стекле стереограмма может рассматриваться стереоскопически. Камера снабжена светосильными

объективами и имеет шторный затвор, позволяющий делать выдержки от $\frac{1}{30}$ до $\frac{1}{1000}$ сек. При производстве профессиональных съемок обычно употребляются фотокамеры большого формата.

Для стереоскопической съемки удаленных объектов применяется иногда телефотографическая стереосъемка через бинокль. Таким способом можно, например, выполнять стереосъемки зверей и животных, не подходя к ним близко.

Крайне важное значение для получения фотографий, воспроизводящих хороший стереоскопический эффект, имеет соблюдение при съемке основных правил и законов технически грамотного выполнения фотографического процесса. Серые, вялые изображения или слишком контрастные изображения, получаемые на снимках в результате неправильно выбранной экспозиции при съемке или в результате неправильно проведенного проявления, значительно ослабляют передачу глубины пространства на стереоскопическом снимке.

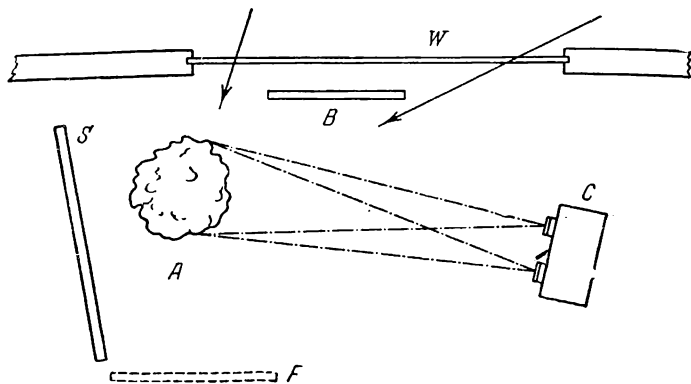


Рис. 114. Правильное освещение объекта при фотографировании стереоскопической фотокамерой:

W — окно; B — полупрозрачный щит; C — стереофотоаппарат;
A — объект; S — отражательный экран

Большое значение для получения стереоскопического эффекта имеет правильный выбор композиции стереоскопического кадра, правильное освещение объекта во время съемки и, наконец, правильный выбор съемочного базиса и предотвращение перекосов получаемых изображений.

Для равномерного высвечивания изображений при съемке рекомендуется применять отражающие свет экраны, как это схематически показано на рис. 114. Равномерное высвечивание объекта смягчает контрасты на фотографическом снимке, позволяя тем самым воспроизводить больше мелких деталей, характеризующих рельеф данного объекта. Очень важно также выявить освещением фактуру поверхности снимаемого объекта.

Расчет величины съемочного базиса, необходимого для неискаженного воспроизведения на стереоскопическом снимке естественных пространственных соотношений в натуре, подробно освещен в главе IX «Метрика стереоскопического пространства». Однако здесь можно заметить, что если стереоскопическая фотосъемка производится не с измерительными целями, то обычно фотографирование объектов, удаленных на расстояния от 1 до 10—20 м, выполняют обычными стереофотоаппаратами, имеющими нормальный базис между объективами, равный 65 мм.

При съемке более удаленных объектов съемочный базис выбирают обычно равным $\frac{1}{50}$ от дистанции, на которую удален снимаемый объект. Для определения необходимого базиса в данном случае можно пользоваться графиком, приведенным на рис. 103. Стереосъемку с очень малых расстояний (ближе 25 см) выполняют с уменьшенным базисом.

На практике при съемке бывает очень важно для получения на сопряженных изображениях стереограммы горизонтальных параллаксов строго соблюдать горизонтальное направление линии съемочного базиса. Однако в случае не слишком большой глубины воспроизводимого на

снимке пространства некоторые отклонения направления базисной линии во время съемки допустимы, если впоследствии при печати стереограммы восстановить нормальное положение косо снятых изображений стереограммы (листы XIV—XV).

§ 4. ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ПЕЧАТЬ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ СПИМКОВ

В результате фотографической съемки получают негативы стереограммы. Только в редких случаях в микрофотографии, рентгенофотографии и других научных исследованиях ограничиваются наблюдением рельефа объектов непосредственно по негативной стереограмме, но в большинстве случаев с негатива полученной стереограммы делаются позитивные отпечатки. Негативы стереограммы требуют для их рассматривания специальной подготовки. Эта подготовка заключается в расположении полученных изображений стереограммы в таком порядке, чтобы при наблюдении стереограммы в стереоскопе правый глаз наблюдателя видел правое изображение стереограммы, а левый глаз — левое; при этом изображения должны быть пространственно правильно ориентированы.

Изготовление позитивных отпечатков стереограммы обычно делается фотографическим способом на бумаге или же на диапозитивных пластинках. При необходимости изготовления большого количества копий отпечатки могут быть изготовлены полиграфическими методами печати.

Оборачивание частичных изображений негативной стереограммы. Рассмотрим принципиальную схему хода лучей от объекта через объективы в стереофотоаппарате. Схема такой проекции изображена на рис. 115, А. Объект AB фотографируется двумя объективами аппарата O и O_1 . На негативе получаются два изображения объекта. Эти изображения b, a и b', a' оказываются перевернутыми. Чтобы их видеть правильно, необходимо негатив перевернуть и рассматривать его с обратной стороны, т. е. через стекло. Однако при таком оборачивании негатива, как нетрудно заметить, изображение, снятое правым объективом, оказывается расположенным слева, а изображение, снятое левым объективом, — справа. Очевидно, чтобы каждому глазу наблюдателя предоставить возможность видеть соответствующее ему изображение стереограммы, необходимо негатив стереограммы разрезать пополам и поменять местами правое и левое изображения.

Поэтому в тех случаях, когда для ускоренного получения результатов исследования пользуются изучением рельефа по негативной стереограмме, целесообразно фотографировать стереограмму на двух отдельных пластинках. После проявления пластинки должны оборачиваться и взаимно меняться местами для соответственного наблюдения правого изображения правым глазом, левого — левым глазом.

Изготовление позитивных стереоскопических отпечатков может быть выполнено фотографическим путем двояко: стереоскопический позитив может быть получен путем контактной печати или путем проекционной печати негативной стереограммы на фотобумагу (а также на позитивную пленку или диапозитивную пластинку).

Последовательность процесса контактной печати представлена на рис. 115. Чтобы на отпечатке поменять местами правое и левое изображения, можно поступить так: вначале напечатать правое изображение стереограммы на левой половине фотобумаги, как это показано в положении B , затем на правой половине фотобумаги отпечатать контактно левое изображение, как это показано на фигуре C . Полученный позитивный отпечаток на бумаге в этом случае будет иметь взаимно перемещенные правое и левое изображения D . Но так как эти изображения оказываются перевернутыми, то для правильного рассматривания весь отпечаток следует повернуть на 180° , рис. 115, E . При таком оборачивании отпечатка правое изображение

окажется справа, а левое — слева, вследствие чего они могут быть правильно наблюдаемы в стереоскопе.

Другой порядок печати позитива стереограммы заключается в том, что с негатива на фотобумагу делается обычный контактный отпечаток обоих изображений стереограммы одновременно. Затем отпечаток на бумаге разрезается пополам, а правое и левое изображения стереограммы меняются местами и наклеиваются на одну общую подложку. Второй способ изготовления позитивного изображения стереограммы несколько проще первого, но он непригоден, например, в случае необходимости изготовления стереограммы в виде стеклянного диапозитива. Изготовление стеклянного

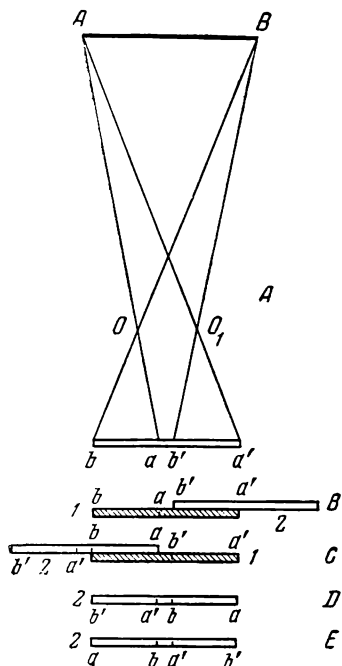


Рис. 115. Схема оборачивания позитивной стереограммы:

1 — негатив; 2 — отпечаток

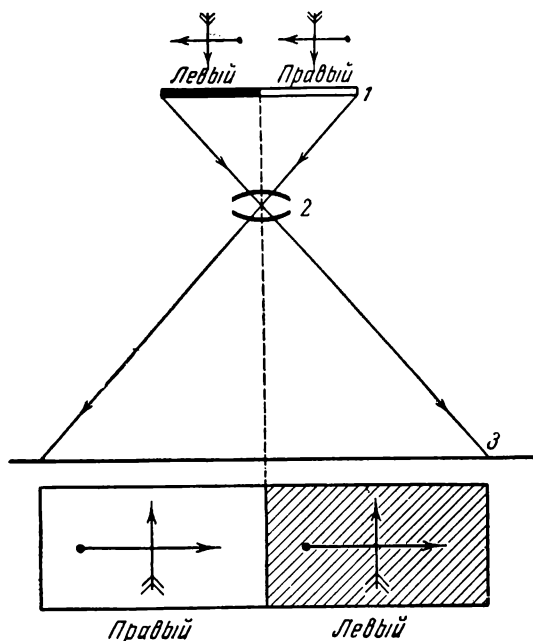


Рис. 116. Проекционная печать позитивной стереограммы:

1 — негатив; 2 — объектив; 3 — отпечаток

диапозитива необходимо выполнять так, как это описано в первом случае, печатая изображение вместо бумаги на диапозитивных фотопластинках.

Проекционная печать позитивной стереограммы схематически представлена на рис. 116. Как видно из этой схемы, при такой печати правое изображение стереограммы перемещается на левую сторону отпечатка, а левое — на правую сторону отпечатка. Следовательно, позитивный отпечаток стереограммы, выполненный путем проекционной печати, придется также разрезать пополам и менять местами правое изображение с левым изображением.

Возможен только один случай проекционной печати стереоскопических изображений, при котором правое и левое изображения стереограммы на позитивном отпечатке не требуется менять местами. Это тот случай, когда проекционная печать каждого изображения негативной стереограммы выполняется самостоятельным объективом, т. е. когда печать стереограммы производится двумя объективами, каждый из которых рисует свое изображение на позитивном отпечатке.

Обработка негативов, снятых стереофотокамерами, а также проявление позитивных отпечатков и другие процессы производятся по схеме, не

отличающейся от процессов обработки обычных негативных и позитивных фотоматериалов.

Изготовление анаглифических диапозитивов субтрактивным методом позволяет получать такие изображения стереограммы, которые могут быть спроектированы на экран любым проекционным аппаратом, предназначенным для проекции обычных диапозитивов данного формата. Наиболее просто анаглифические диапозитивы могут быть изготовлены путем проекционной печати позитивных отпечатков сопряженных изображений стереограммы в виде двух отдельных диапозитивов, которые затем должны быть окрашены. Необходимо только печатать правое и левое

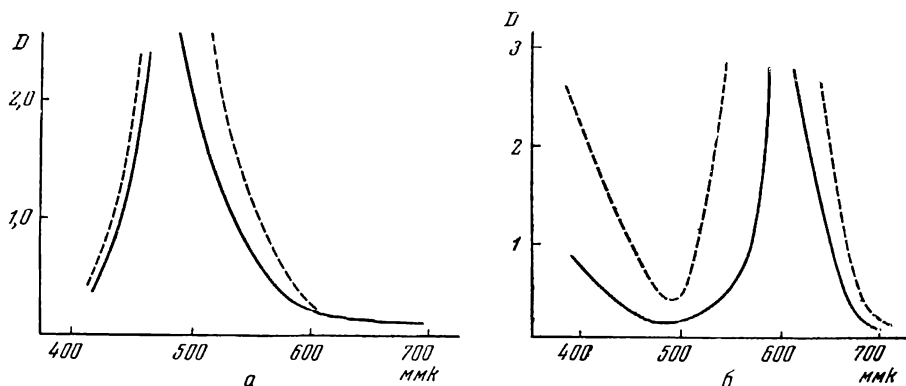


Рис. 117. Спектральные кривые поглощения красителей, применяемых для изготовления анаглифов:

а — «сафронин», б — сине-голубой краситель

изображения стереограммы так, чтобы можно было, сложив оба диапозитивных отпечатка эмульсионными слоями вместе, правильно проектировать изображения на экран. Для этого требуется одно из изображений печатать с негатива, обращенного эмульсионной стороной к объективу, а второе изображение печатать, повернув негатив обратной стороной (подложкой) к объективу.

Каждое из изготовленных таким образом позитивных изображений стереограммы может быть окрашено соответственно в красный и сине-зеленый цвета. Такое окрашивание проще всего выполнить путем протравного вирирования отпечатков. В качестве красителей для вирирования изображений могут быть применены: для красного изображения — «сафронин», спектральная кривая которого показана на рис. 117 а, а для синего изображения — сине-голубой краситель, кривая которого показана на рис. 117, б.

Процесс протравного вирирования заключается в том, что позитив после проявления подвергается действию протравляющего раствора, переводящего серебро в какое-либо соединение, легко адсорбирующее красители. Это соединение затем и окрашивается красителями из водного раствора. Наиболее подходящей для получения анаглифных изображений на пленках оказалась меднороданистая протрава, которая обеспечивает получение наиболее прозрачного и бесцветного протравленного изображения.

Протравленное изображение окрашивается 5—6 мин. в водных растворах красителей, концентрация которых для красного виража может быть рекомендована 0,2%, а для синего — 0,05%. После окрашивания пленку купают в кислотной ванне продолжительностью 2—3 мин. (0,5% уксусной кислоты) и затем 10 мин. промывают водой. Соответственно изменяя время промывки и время пребывания пленки в кислотной ванне, можно регули-

ровать степень насыщенности цветного позитива. После окрашивания изображения стереограммы, сложенные вместе эмульсионными сторонами друг к другу, представляют собой смонтированный анаглифический диапозитив, который может рассматриваться через анаглифические очки непосредственно на просвет или проектироваться на экран. Обычно в красный цвет окрашивается правое изображение стереограммы, которое просматривается через синезеленый светофильтр анаглифических очков, а в синезеленый цвет окрашивается левое изображение, которое просматривается через красный светофильтр. Для изготовления светофильтров можно применять, например, такие красители:

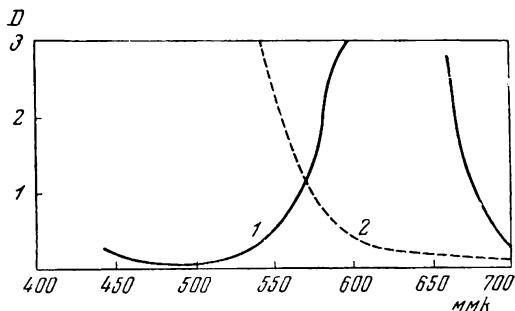


Рис. 118. Кривые пропускания красителей, применяемых для изготовления очков, используемых при рассматривании анаглифической печати:

1 — кислотный ярко-голубой; 2 — конго красный

глаз) — конго красный и для сине-зеленого (левый глаз) — кислотный ярко-голубой. Кривые спектрального пропускания этих красителей показаны на рис. 118.

§ 5. ПОЛИГРАФИЧЕСКАЯ ПЕЧАТЬ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Объемные печатные иллюстрации к книгам могут изготавливаться различными полиграфическими методами. Для получения хороших отпечатков необходимо применять такие из них, которые дают наиболее мелкозернистое изображение. Лучшим следует признать метод фототипии, при котором изображение не разбивается растром, а состоит из очень мелких зерен, невидимых глазу. Хорошие отпечатки стереоскопических изображений могут быть получены и методами глубокой печати. Обычные методы автотипии, разбивающие печатаемое изображение на отдельные элементы в виде точек, менее пригодны для печати стереоскопических изображений, так как в результате преобразования изображения в систему точек на изображениях стереограммы теряются детали, обуславливающие параллактические различия обоих изображений. Поэтому при воспроизведении отпечатков стереограммы методом автотипии необходимо пользоваться достаточно мелким растром и желательно делать отпечатки на высокосортной бумаге.

Несколько меньшие требования к зернистости изображения могут быть предъявлены в случае изготовления отпечатков крупного формата. Но для рассматривания таких изображений, очевидно, уже непригоден обычный линзовый стереоскоп, обладающий малым полем зрения, который к тому же, создавая увеличение рассматриваемых изображений, делает более заметным их зернистость.

Для рассматривания крупноформатных стереоскопических изображений, воспроизводимых полиграфическим способом, наиболее целесообразно использовать принципы цветной анаглифии. Изображения, предназначенные для правого и левого глаза, в этом случае печатаются двумя красками (одно — красной, другое — бирюзовой), наложенными друг на друга. Для наблюдения стереоскопической картины требуется рассматривание изображения через очки с красным и сине-зеленым стеклами (или с красной и сине-зеленой прозрачной пленкой). Способ анаглифической печати нашел довольно широкое применение для воспроизведения стереоскопических иллюстраций. Этим способом печатаются стереоскопиче-

ские иллюстрации к учебникам стереометрии, зоологии, геологии, а также учебные наглядные пособия. В военном деле применялись анаглифически напечатанные военно-топографические рельефные карты.

Для получения стереоскопических изображений полиграфическим путем до последнего времени применялся только субтрактивный метод. Его особенность заключается в применении прозрачных красок. На бумаге печатают, налагая друг на друга, правое и левое изображения стереограммы двумя разными красками. С точки зрения полиграфической техники этот метод не представляет никаких затруднений и не вносит ничего нового в технологию печати. При анаглифической печати обе пары бинокулярных стереоскопических изображений налагаются одна на другую в различных красках так, чтобы верхняя краска давала возможность полностью видеть отпечатки, сделанные нижней краской. Обычно применяют лессировочные или другие прозрачные или полупрозрачные краски. Чтобы рассматривать изображение, пользуются очками со светофильтрами такого же цвета для разделения изображений. Цвета красок и фильтров желательно подбирать так, чтобы при рассматривании получался нейтральный серый тон. Для печати анаглифических изображений необходимо подобрать такие краски, которые имели бы хорошую отражательную способность в данной области спектра, чтобы при наблюдении через светофильтр одинакового цвета нельзя было различить на фоне чистой бумаги напечатанное данной краской изображение. С другой стороны, эта краска должна сильно поглощать лучи остальной части спектра, чтобы через второй светофильтр контрастно выделялось изображение, напечатанное этой краской, и воспринималось черным.

Из существующих печатных красок легко подобрать удовлетворяющую этим требованиям красную краску, но значительно труднее найти подходящую бирюзовую (сине-зеленую) краску. На рис. 119 приведены спектральные кривые отражательной способности ряда отечественных печатных красок, наиболее подходящих для анаглифической печати. Можно считать, что для печати красных изображений пригодна ярко-красная краска № 206 с некоторой добавкой оранжевой краски № 102 или № 104. Для печати сине-зеленого изображения могут использоваться бирюзовые краски № 378 и 365 или светло-голубая краска № 396. По исследованиям С. С. Гуревича, проделавшего большую работу в области разработки технологии печати объемных иллюстраций методом субтрактивных анаглифов, наилучшей краской для печати сине-зеленого изображения надо считать бирюзовую краску № 378. Эта краска должна употребляться без каких-либо добавок.

Во всяком случае, чтобы не ухудшить и так не очень высокую отражательную способность этой краски в сине-зеленой части спектра, в эту краску при печати не следует добавлять олифу, мягчитель или белила. Красная же краска может разбавляться олифой, которая не ухудшает ее спектральных характеристик. Обычно вначале печатают довольно слабо правое изображение стереограммы бирюзовой или светло-голубой краской. Оттиску дают просохнуть и только после этого делают второй прогон, печатая поверх правого левое изображение стереограммы, но уже красной краской. Такой порядок печати объясняется главным образом тем, что красная краска благодаря интенсивности и возможности смягчения ее олифой хорошо ложится поверх бирюзовой краски, в то время как при слабой печати бирюзовая или светло-голубая краски плохо ложатся на красную краску.

Изготовление анаглифических иллюстраций лучше всего производить способом высокой печати, но их можно печатать и способами плоской печати (офсет и литография). Способы глубокой печати и фототипия непригодны из-за невозможности осуществлять этими способами двухкрасочную печать с применением лессировочных красок. Хотя высокая

печать требует применения определенных сортов бумаги, но она обеспечивает наилучшее воспроизведение анаглифических изображений с получением хорошего стереоскопического эффекта в тоновых и штриховых иллюстрациях. Офсетная печать и литография с достаточным успехом могут быть использованы только лишь для воспроизведения штриховых анаглифических иллюстраций.

Для обеспечения правильного совмещения при печати правого и левого изображения стереограммы каждое из изображений должно быть обведено рамкой, которая и контролирует правильную приводку красочной печати анаглифических изображений.

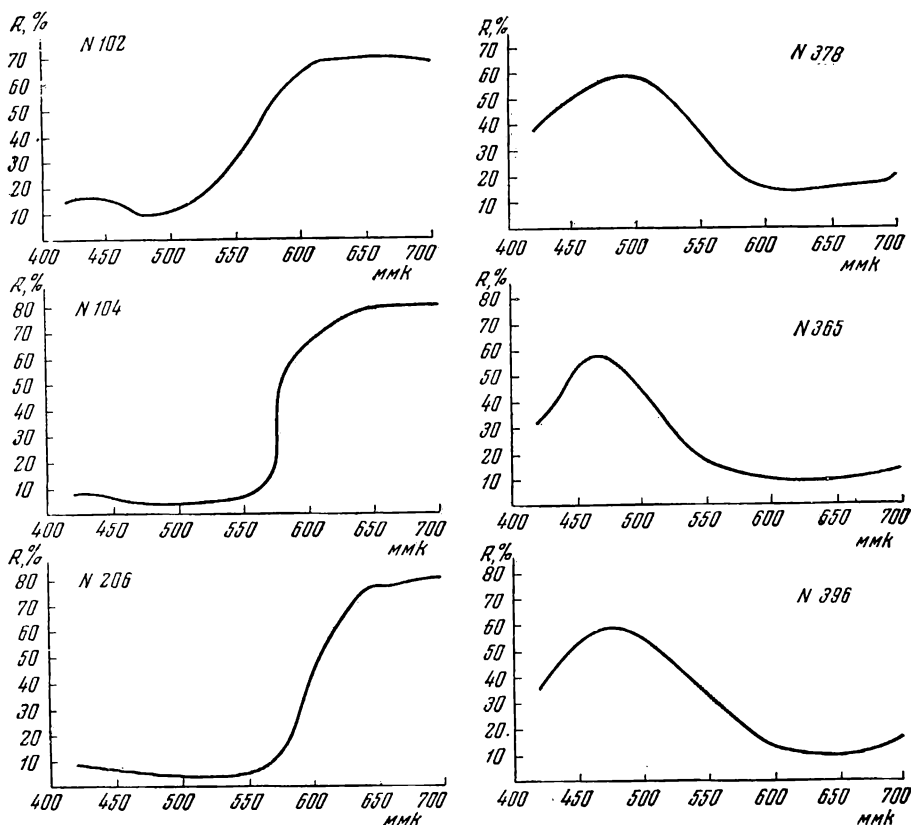


Рис. 119. Кривые спектра поглощения печатных красок: № 102, 104, 206, 378, 365, 396

Помимо субтрактивного метода, в последние годы был применен аддитивный метод анаглифической печати объемных иллюстраций, который в основном был использован для воспроизведения рельефных топографических карт. В этом случае правое и левое изображения стереограммы печатаются кроющими (непрозрачными) красками на черный фон. Красной краской в этом случае обычно печатается правое изображение, а бирюзовой — левое, которые соответственно рассматриваются правым глазом через красный светофильтр, а левым глазом — через сине-зеленый светофильтр. При таком способе печати удастся достичь более четкой сепарации правого и левого изображений стереограммы, поскольку каждый глаз через соответствующий светофильтр видит только яркости напечатанного данной краской изображения. Хотя в данном методе и достигается высокая частота сепарации сопряженных стереоизображений, практически недо-

статочно хорошее воспроизведение деталей яркости самого изображения, и недостатки правильного воспроизведения яркости участков изображения, в которых обе печатные краски совмещаются, ограничивают применение этого метода. Большую работу по совершенствованию технологии анаглифической печати рельефных топографических карт провел Н. И. Синяков в 1941—1945 гг.

Как для аддитивного, так и для субтрактивного способов подбор красок и выбор красителей для очков делается по рассмотрению их кривых спектрального пропускания. Очень важно цвета очковых светофильтров и красок подбирать так, чтобы очковые светофильтры уравнивали плотность одного изображения стереограммы с фоном, а плотность другого, окрашенного в противоположный цвет, контрастно выделяли так, чтобы происходило почернение контуров этого изображения. На листах XVI—XIX приведены образцы анаглифических изображений.

Для правого глаза в очках обычно применяется сине-зеленый светофильтр, а для левого — красный светофильтр. Светофильтры в очках делаются чаще всего пленочными в виде окрашенных желатиновых или целофановых пленок. Для окрашивания пленок в красный цвет применяются уже упоминавшиеся нами красители: конго красный, сафранин с тетразоном или другие красители, как например эозин, у которых спектральные характеристики не сильно отличаются от кривых спектрального поглощения красных красителей, приведенных нами на рис. 117. Точно так же для получения сине-зеленого светофильтра применяются уже упомянутые красители: кислотный ярко-голубой 3, метиленовый голубой, основной ярко-зеленый, кислотный зеленый и другие, спектральные характеристики которых не должны сильно отличаться от приведенных на рисунках кривых спектрального поглощения сине-зеленого красителя.

При печати стереоскопических иллюстраций следует иметь в виду, что чем больше увеличение печатаемого стереоскопического изображения, тем больше рельефность наблюдаемого пространственного изображения, так как пластичность зависит от увеличения рассматриваемой картины. Надо иметь в виду, что, изменяя точку наблюдения анаглифического изображения, мы изменяем угол зрения, что также приводит к изменению наблюдаемой пластичности изображения.

Следующий вопрос, на который надо обратить внимание при печати анаглифических иллюстраций, — это совмещение правого и левого изображений стереограммы. Та деталь изображенного предмета, которая при печати правого и левого изображений стереограммы совмещается на отпечатке друг с другом, будет казаться наблюдателю лежащей в плоскости самого отпечатка. Детали предмета, находящиеся ближе, будут смещены на правом изображении влево и на левом изображении — вправо от совмещения, а детали, более удаленные, будут смещены на правом изображении вправо и на левом изображении — влево от среднего положения. Практика показывает, что очень трудно воспринимаются наблюдателем выступающие вперед детали, и поэтому нельзя рекомендовать значительную часть пространственного изображения выдвигать вперед. В особенности это следует иметь в виду по отношению к краевым деталям изображения, т. е. к деталям, лежащим у границы отпечатка.

Глубина передаваемого пространства на отпечатке оказывается максимальной в том случае, когда совмещаются друг с другом средние планы правого и левого изображений стереограммы. Очень большое несоответствие контуров правого и левого отпечатков по горизонтали недопустимо, так как приводит к нарушению слитного восприятия стереоскопического изображения из-за того, что при наблюдении такого отпечатка происходит разрыв в согласованности действия аккомодации и конвергенции глаз. Практически допустим сдвиг контуров, не превышающий 3—5 мм.

Несовпадение контуров изображений по вертикали считается вообще недопустимым, так как очень сильно утомляет зрение при рассматривании такого рода дефектных отпечатков (практическим пределом такого несовпадения следует считать $0,2 + 0,3$ мм). Каждый в отдельности отпечаток в зависимости от характера передаваемого изображения может оказаться более выигрышным в отношении воспроизведения рельефа, достигаемого путем практических проб при печати совмещением того или иного плана.

§ 6. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ОТПЕЧАТКОВ В ВИДЕ ВЕКТОГРАФОВ

Один из наиболее совершенных способов воспроизведения стереоскопических фотографий является печать стереоскопических изображений в виде вектографов. Такой способ относится, как мы заметили выше, к субтрактивному методу поляризованных анаглифов. При этом методе яркости наблюдаемых правым и левым глазом деталей изображения образуются в результате поглощения части светового потока поляризационными светофильтрами, устанавливаемыми перед глазами зрителя.

В принципе изготовление стереоскопических вектографов возможно следующим образом. Во-первых, для изготовления каждого из отпечатков, составляющих вектограф, можно взять уже готовый пленочный поляризованный светофильтр — поляроид и сделать на нем оттиск фотографического изображения специальной краской, вернее, особым химическим реагентом, который уменьшил бы степень поляризации поляроида в светлых участках изображения. Складывая полученные таким образом два поляризационных отпечатка правого и левого изображений со взаимно-перпендикулярно ориентированными плоскостями поляризации, можно получить готовый вектограф.

Для изготовления поляризационных отпечатков может быть избран второй путь. В качестве основы для отпечатков берется не готовый поляроид, а прозрачная пленка такого вещества, которое может быть при помощи химического реагента превращено в поляроид. Делая оттиск фотографического изображения на этой пленке соответствующим химическим составом, превращают отдельные участки пленки в поляризационные светофильтры различной степени поляризации. Чем темнее должен быть данный участок изображения, тем сильнее должен воздействовать на него химический реагент, вызывая большую степень поляризации материала в этом месте. Ориентация плоскости поляризации на пленке для всех участков одного изображения одинакова, на второй пленке, на которой печатается другое изображение стереопары, плоскость поляризации ориентируется взаимно-перпендикулярно к плоскости поляризации первого отпечатка. Готовый вектограф в данном случае представляет также сложенные вместе два поляризационных отпечатка.

Третий путь изготовления стереоскопических вектографов можно представить следующим образом. Каждый участок поверхности вектографа должен характеризоваться двумя значениями яркостей воспроизводимых им деталей правого и левого изображений. Эти две величины могут быть определены, например, по общей суммарной яркости этих деталей и по соотношению их яркостей. Для воспроизведения соотношений яркостей деталей правого и левого изображений каждый участок поверхности вектографа может быть представлен соответствующим поворотом плоскости поляризации данного участка вектографа. Например, при равенстве яркостей правого и левого изображений деталей, воспроизводимых данным участком вектографа, плоскость поляризации этого участка должна быть ориентирована так, чтобы она составляла угол 45° с плоскостью поляризации как правого анализатора, так и левого анализатора у поля-

роидных очков, через которые рассматривается вектограф. В том случае, если яркость правого изображения должна быть больше яркости левого изображения, плоскость поляризации данного участка вектографа должна быть ориентирована так, чтобы составлять меньший угол с плоскостью поляризации правого анализатора. Наоборот, если яркость правого изображения должна быть меньше яркости левого, то плоскость поляризации участка вектографа должна составлять меньший угол с плоскостью поляризации левого анализатора, чем с плоскостью правого. Регулирование общего светового потока, проходящего через данный элемент вектографа, в этом случае должно производиться не изменениями степени поляризации, а изменениями оптической плотности отпечатка. При наблюдении однослойного вектографа через два анализатора со взаимно-перпендикулярно ориентированными плоскостями поляризации изменения яркости деталей изображения, получаемые в результате изменений степени поляризации участков вектографа, ограничены очень небольшими пределами. Изменения оптической плотности участков вектографа могут быть достигнуты печатанием на нем обычного черно-белого фотографического изображения, регулирующего общее прохождение света.

В настоящее время известен ряд практических рецептов для изготовления стереоскопических отпечатков в виде вектографов. Американская фирма «Поляроид» по патенту Лэнда выпустила набор химических и оборудования для печати стереоскопических черно-белых вектографов. Имеются сообщения и о цветных стереоскопических вектографах.

Приведем краткое описание одного из методов изготовления стереоскопических вектографов. Правые и левые изображения стереопары в виде негатива получают обычным способом стереофотографирования. Изображения с негатива печатаются на матричную пленку или на пленку с хромированной желатиной. Матричная пленка представляет собой обычную позитивную фотопленку с мелким зерном. Такая пленка проявляется в дубящем проявителе, в результате чего на пленке вокруг проявленных зерен эмульсии задубливается желатиновый слой. На хромированной желатине слой задубливается непосредственно под действием света. Участки, на которые падало при экспонировании большее количество света, задубливаются сильнее, чем те, на которые падало меньше света. После обычного фиксирования полученный фотографический отпечаток с частично задубленной желатиной промывают в горячей воде, где незадубленные слои желатины растворяются и вымываются. На матричной пленке остается рельефное изображение задубленного слоя желатины. Такое изображение отбеливается в растворе красной кровяной соли или в отбеливающей ванне другого состава. В результате получается рельефная матрица с хорошей адсорбирующей способностью.

Таким образом, изготавливаются две матрицы правого и левого изображений стереопары, которые смачиваются в растворе иода. Между двумя матрицами закладывается материал, на который печатаются с обеих сторон изображения. Перенос иодных изображений с матриц на материал осуществляется путем прикатки матриц с помощью резиновых валиков. Материал, на который переносятся изображения, представляет собой пленку, составленную из трех прозрачных слоев. Средний слой представляет собой тонкую прозрачную изотропную пленку, верхний и нижний слои — пленки из поливинилового спирта, растянутые во взаимно-перпендикулярных направлениях. Растянутые пленки анизотропны. При пропитке иодом (а также некоторыми другими химическими составами и красителями) они становятся дихроичными, т. е. поглощающими обыкновенный или необыкновенный луч. Степень дихроичности пленок зависит от количества вошедшего в них иода. Следовательно, перенося с рельефных матриц различные количества иода на разные участки поверхности растянутых поливиниловых пленок, получают поляроиды с различной степенью

поляризации, зависящей от количества иода, вошедшего на этих участках в пленку.

После переноса изображений с матриц на трехслойный материал поляризационные отпечатки закрепляются. Для этого полученные отпечатки вначале купают в гипосульфитной ванне, которая регулирует плотность изображения, затем их помещают в раствор борной кислоты, представляющий стабилизирующую ванну. Борная кислота дубит поливиниловый спирт и уплотняет слой, препятствуя выходу из него иода. Изготовление вектографа заканчивается покрытием его оборотной стороны алюминиевым лаком для усиления отражательной способности, а лицевой стороны — прозрачным защитным лаком.

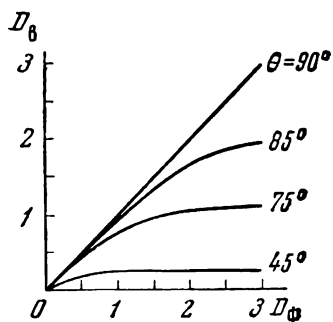


Рис. 120. Характер изменения плотности при использовании идеального поляризатора в вектографе

Готовый стереоскопический вектограф для непосредственного рассматривания состоит из следующих слоев: 1) алюминиевого лака, 2) поляризационного отпечатка для правого глаза, 3) прозрачной изотропной пленки, 4) поляризационного отпечатка для левого глаза, 5) слоя прозрачного защитного лака.

Вектографный диапозитив состоит из следующих слоев: 1) прозрачной пленки с матированной поверхностью, 2) поляризационного отпечатка для правого глаза, 3) про-

зрачной изотропной пленки, 4) поляризационного отпечатка для левого глаза, 5) прозрачного защитного лака.

Если такой изготовленный вектограф рассматривать через «идеальный» поляризатор, вращая его вокруг оси, перпендикулярной плоскости вектографа, то плотность последнего будет меняться в зависимости от угла поворота и выражаться по отношению к плотности фотоснимка, как это показано на рис. 120.

Здесь мы видим, что увеличение почернений в области больших плотностей происходит быстрее, чем в области малых, но воспроизведение приближается к линейности в широком диапазоне плотностей по мере приближения угла к 90° . На практике яркость теней и высоких светов вектографа зависит от так называемого дихроичного отношения поляризующего материала, в котором образуется изображение. В настоящее время имеются поляризаторы с чрезвычайно высокими дихроичными значениями, а получаемые изображения практически беззернисты. Благодаря коллоидальному или микроскопически малому размеру поляризующих частиц, а также ввиду того, что поляризующий слой чрезвычайно тонок, на вектографической пленке могут получаться последовательные изображения с очень большой резкостью. Эта резкость в сочетании с широкой линейной шкалой плотностей делает вектографическое изображение вполне удовлетворительным для фотографического воспроизведения. Цвет получаемых вектографических изображений в значительной мере зависит от состава отбеливающей ванны.

Вектографы представляют идеальным решением классической проблемы наложения левого и правого изображений стереограммы. Изображения для левого и правого глаза обычно изготавливаются в виде двух отпечатков с перекрещивающимися осями поляризации. Стереовектограф состоит из двух таких наложенных друг на друга отпечатков. Наблюдатель надевает очки с поляроидами для рассматривания, у которых плоскости поляризации анализаторов установлены в соответствии с плоскостями поляризации изображений. Для рассматривания вектографов, представляющих субтрактивный метод поляризационных анаглифов, анализатор

у правого глаза должен иметь плоскость поляризации, перпендикулярную к направлению колебаний света, образующего изображение, наблюдаемое правым глазом. Черные участки изображения выделяются анализатором, белые участки видны вследствие того, что они не поляризованы. Этот способ изготовления стереоскопических отпечатков пригоден для получения прозрачных изображений в виде диапозитивов и кинофильмов, а также в виде отпечатков на непрозрачных подложках для рассматривания в отраженных лучах.

При использовании вектографов для проекции одна составляющая колебаний света образует изображение для левого глаза, а другая составляющая — изображение для правого глаза. Следовательно, стереоскопическая проекция может производиться при помощи одного проектора, причем количество света, получаемое от этого проектора с данным световым потоком, получится таким же, как при проекции аддитивных поляризационных анаглифов, использующих два проектора, каждый из которых имеет тот самый световой поток. Конечно, для проектирования вектографов нет никакой необходимости применять какую-либо поляризующую приставку к объективу, так как вектографы являются самополяризующими. Если вместо вертикальной и горизонтальной плоскостей поляризации выбраны плоскости поляризации, направленные под углом 45° к горизонтали, то перестановка диапозитива обратной стороной вместе с зеркальным оборачиванием делает видимым левое изображение для правого глаза, и наоборот. Следовательно, вектографный диапозитив может быть перевернут, не становясь псевдоскопическим. Надписи на поверхности вектографа будут казаться при проекции находящимися на плоскости экрана.

Диапозитивные вектографы могут иметь практическое значение как для проекции, так и в виде отпечатков для непосредственного рассматривания.

§ 7. ИЗГОТОВЛЕНИЕ АВТОСТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ФОТОГРАФИЙ НА ЛИНЗОВО - РАСТРОВОЙ ПЛЕНКЕ

Практическое выполнение автостереоскопических фотографий оказывается особенно простым при применении для их изготовления линзово-растровой пленки. С применением линзово-растровой пленки благодаря большой светосиле линзового растра возможно изготовлять автостереоскопические фотографии не только на прозрачных подложках в виде диапозитивов, но и на непрозрачных подложках в виде обычных фотографических отпечатков. Применение многослойной линзово-растровой пленки позволяет получить цветные автостереоскопические фотографии, на которых можно без каких-либо оптических устройств наблюдать пространственное изображение снятого объекта с его естественной окраской.

Линзово-растровая пленка представляет собой фотопленку с оптическим растром в виде сети мелких линзочек, покрывающих сторону пленки, обратную эмульсионной стороне. Конструктивно линзочки выполняются из материала основы пленки путем ее гофрирования. Впервые пленка была изготовлена в 1928 г. Бертоном. Она имела целлулоидную поверхность, покрытую серией мелких сферических линзочек в виде сотовой структуры. Число отдельных линзочек достигало 15 на 1 мм ширины пленки и составляло 225 линзочек на 1 мм² поверхности. Пленка изготовлялась путем гофрировки ее барабанчиком, специально выгравированным вручную. Впоследствии линзово-растровая пленка стала изготовляться не со сферическими, а с полуцилиндрическими элементами, идущими вдоль по длине пленки (рис. 121). Процесс изготовления такой пленки значительно проще вследствие механического гравирования гофрирующего барабанчика.

Пленка с полуцилиндрическим линзовым растром была освоена промышленностью. На рис. 122 приведены сильно увеличенные профили микросрезов линзово-растровой пленки, полученной автором. Для изготовления автостереоскопических фотографий пригодна линзово-растровая пленка как со сферическим, так и с полуцилиндрическим растром.

Печать автостереоскопических изображений на линзово-растровую пленку может производиться с обычной негативной стереограммы, снятой любым из существующих типов стереофотоаппаратов или сфотографированной однообъективным фотоаппаратом одним из способов, указанных нами выше. Может быть использована и уже готовая стереограмма, полученная, например, графическим исполнением.

Чтобы каждое из изображений стереограммы было видно со своей точки зрения, необходимо строго соблюдать соответствие в расположении

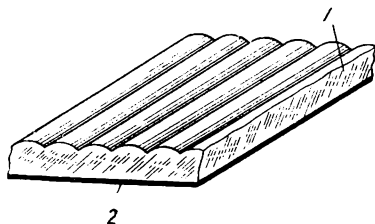


Рис. 121. Линзово-растровая пленка с полуцилиндрическими элементами:

— целлулоид; 2 — эмульсия



Рис. 122. Микросрезы линзово-растровой пленки

полосок параллакс-стереограммы, получающейся на светочувствительном слое фотоматериала, относительно расположения оптических элементов линзового раstra пленки. Механическое распределение полосок стереограммы с достаточной степенью точности относительно линзочек весьма затруднительно. Поэтому автоматическое распределение полосок параллакс-стереограммы на эмульсионном слое пленки за каждой линзочкой практически возможно только путем проекционной печати каждого из изображений стереограммы из своего центра проекции, в котором впоследствии будут находиться глаза наблюдателя, рассматривающего стереоскопическое изображение.

Если объектив, проецирующий на линзово-растровую пленку одно изображение стереограммы, расположить на таком же расстоянии от пленки, на котором впоследствии будет находиться глаз наблюдателя, то, спроектировав на линзово-растровую пленку это изображение лучами, выходящими из центра O_1 , мы получим на светочувствительном слое пленки изображение стереограммы, разбитое на полосы. Но по закону обратимости хода лучей мы будем иметь возможность собрать в этой же точке O_1 лучи, отраженные от каждой полоски сфотографированной стереограммы. Точно так же и для второго сопряженного изображения стереограммы будем иметь свой центр проекции O_2 , находящийся от первого на расстоянии нормального базиса, из которого проектируется это изображение на тот же участок линзово-растровой пленки, что и из центра проекции O_1 . Второе сфотографированное изображение будет давать при обратном ходе лучей сходимость в точке O_2 . Помещая в точку O_2 другой глаз, мы, смотря одновременно двумя глазами, будем видеть изображение стереоскопически (рис. 123). Чтобы можно было на линзово-растровой пленке зафиксировать совершенно отдельно два изображения стереограммы, необходимо, чтобы линзовые элементы пленки фокусировали падающие на них лучи из проекционного объектива точно на по-

верхности эмульсионного слоя пленки, а полосы правого и левого изображений параллакс-стереограммы располагались в чередующемся порядке на одинаковом расстоянии друг от друга (рис. 123).

Для выполнения этого условия необходимо, чтобы фокусное расстояние линзовых элементов (f) удовлетворяло условию

$$f = \frac{ndy}{2B},$$

где f — фокусное расстояние линзовых элементов пленки; d — ширина растровых

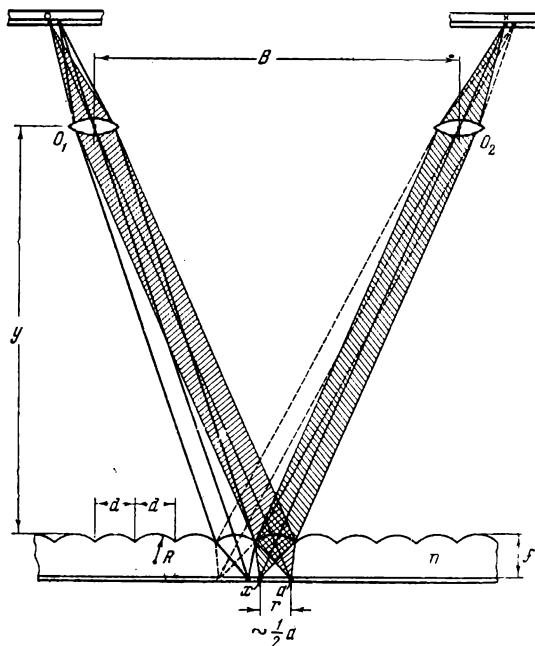


Рис. 123. Оптическая схема образования автостереоскопического изображения на линзово-растровой пленке

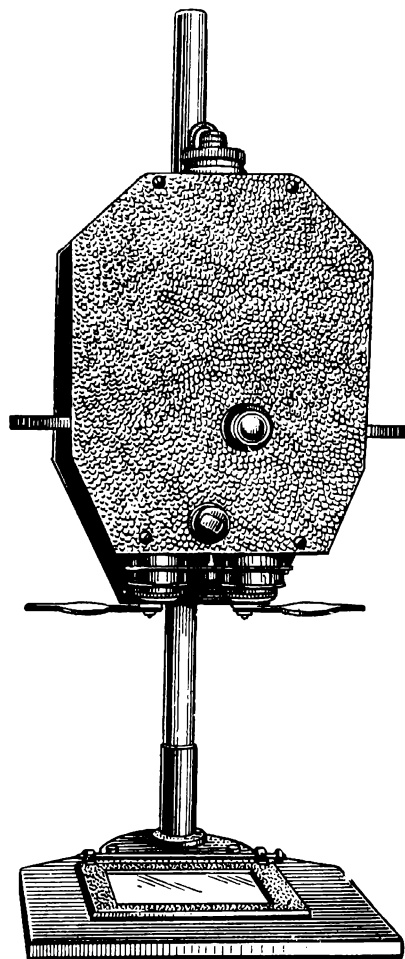


Рис. 124. Общий вид проекционного аппарата для печати изображений на линзово-растровую пленку

элементов (т. е. ширина линзочек) на поверхности пленки; n — показатель преломления материала пленки; y — проекционное расстояние, т. е. расстояние от проекционных объектов копировального аппарата до линзово-растровой пленки; B — базис между проекционными объективами.

Чтобы лучи от проекционных объективов фокусировались линзовыми элементами пленки на эмульсионном слое, очевидно, фокусное расстояние этих линз должно равняться толщине основы самой пленки. Обычные сорта позитивной фотопленки имеют толщину основы от 120 до 140 мк. Показатель преломления для этих сортов нитроацетатной пленки имеет величину около 1,5—1,51. Имея в виду, что проекционное расстояние при копировке стереоотпечатка на линзово-растровой пленке должно соответствовать тому расстоянию, с которого будет впоследствии рассматриваться этот отпечаток (расстояние между объективами должно соответствовать

расстоянию между зрачками наблюдателя), оказывается, что величины, входящие в приведенную выше формулу, строго определяют основные параметры линзово-растровой пленки, пригодной для изготовления авто-стереоскопических отпечатков.

Проекционное расстояние, с которого рассматривается отпечаток, определяется расстоянием, равным обычно 200—250 мм. Расстояние между проекционными объективами соблюдается равным среднему расстоянию между зрачками глаз или несколько больше, от 60 до 90 мм.

Кривизна микроскопических линзочек на поверхности пленки может быть определена следующей зависимостью от толщины пленки и ее показателя преломления:

$$R = f \frac{n-1}{n},$$

где R — радиус кривизны линз пленки; f — толщина пленки (равна фокусному расстоянию линз); n — показатель преломления материала основы пленки.

Обе приведенные здесь зависимости могут быть применимы для определения основных параметров линзово-растровой пленки как со сферическими, так и с цилиндрическими элементами раstra. Для указанных выше условий копировки автостереоскопических изображений при применении существующих сортов позитивной фотопленки радиус кривизны микроскопических линзочек на пленке оказывается в пределах от 40 до 45 мк. Приведенные выше соотношения определяют форму микрорельефа матриц, служащих для изготовления линзово-растровой пленки.

Приготовление форматной линзово-растровой пленки. Наиболее прост способ изготовления линзово-растровой пленки в виде отдельных листов небольшого формата. Такую форматную линзово-растровую пленку может приготовить для себя даже фотолюбитель. В качестве исходного материала берется обычная позитивная фотопленка, изготовленная на нитро-целлюлозной основе. Целлулоидная сторона этой пленки подвергается гофрировке путем прикатывания ее к особой матрице. (Матрица представляет собой медную пластинку, одна из поверхностей которой имеет микроскопический рельеф в виде мелких линзочек со сферическими или цилиндрическими поверхностями). Рельеф переносится путем оттилка на нее рельефа матрицы. Однако такой оттилка практически может быть получен только при очень больших давлениях. Чтобы уменьшить давление матрицы на пленку и технически упростить процесс перенесения рельефа, поверхность матрицы перед соприкосновением с пленкой смягчается особым растворителем, представляющим смесь этилового спирта и ацетона. Для обычных сортов отечественной фотопленки количество этилового спирта должно быть от 40 до 60%. Смягчение матрицы рекомендуется производить путем купания ее в ванночке, в которую налит растворитель. После этого, дав стечь излишку растворителя, на полувлажную поверхность матрицы прикатывают пленку. Прикатка пленки производится вручную с применением резинового валика.

По мере пользования растворителем из него в первую очередь испаряется ацетон, поэтому в процессе работы его рекомендуется постепенно добавлять. Следует иметь в виду еще одно обстоятельство: некоторые сорта фотопленки покрываются с целлулоидной поверхности защитным лаком. Такие фотопленки трудно поддаются прикатке к матрице, в этих случаях применяют другой растворитель.

Можно указать на некоторые практические особенности прикатки пленки к матрице. Обычно свежеприготовленный растворитель действует хуже. По мере изготовления линзово-растровой пленки оттилки получают более равномерными. Это происходит вследствие попадания в раст-

воритель известного количества целлулоида, растворяемого с поверхности предыдущих образцов пленки. Следует заметить, что даже незначительная примесь воды в растворителе приводит к браку получаемых образцов: на поверхности приготовленной линзово-растровой пленки появляется белый налет.

Чтобы растворитель с поверхности матрицы проник возможно глубже в пленку, необходимо, чтобы прикатанная к матрице фотопленка выдерживалась в таком положении 5—10 мин. При этом получается более правильный рельеф на пленке и предотвращается последующее ее коробление. Пленка с матрицы снимается отдергиванием ее за один из уголков. Получаемый образец укладывают между листами фильтровальной бумаги и помещают в темное место под легкий пресс.

Процесс изготовления позитивной линзово-растровой пленки может происходить при красном свете. Изготовленные образцы должны иметь резко выраженный рельеф на целлулоидной поверхности. Правильно изготовленная линзово-растровая пленка должна обладать свойством фокусирования падающих на нее лучей за микроскопическими линзочками на эмульсионном слое. Такое фокусирование легко обнаружить, если направить на пленку лучи от точечного источника света. Практически достаточно повернуть целлулоидную поверхность пленки к лампочке красного фонаря. Если теперь эту пленку слегка покачивать в руке, она при определенных положениях должна казаться то очень яркой, то очень темной. Такое различие яркости пленки — наилучшее свидетельство хорошего качества полученного образца.

Печать стереоскопических изображений на линзово-растровую пленку. Для проекционной печати стереоскопических изображений на линзово-растровую пленку служит, как мы уже сказали, копировальный аппарат с двумя объективами. Этот аппарат состоит из ящика, в котором помещены лампы, освещающие негатив стереограммы. Негатив стереограммы освещается через конденсоры или молочное стекло, которые поставлены для равномерности освещения. Негатив стереограммы делается на стекле (для предотвращения деформаций) и укрепляется в подвижной раме (в ползках) для возможности перемещения, обеспечивающего соответствующие сдвиги проектируемых изображений. Негатив разрезается таким образом, чтобы можно было свободно совмещать оба изображения, проектируемых на линзово-растровую пленку. Проекционные объективы расположены на расстоянии 65 мм друг от друга и на высоте около 250 мм от стола, на который кладется линзово-растровая пленка.

Процесс фотографической печати стереоскопических изображений на линзово-растровую пленку в нашей экспериментальной работе осуществлялся обычно следующим образом. Стереограмма (в виде двух негативов «правого» и «левого» сопряженных изображений) проектировалась двумя объективами на линзово-растровую пленку. Расстояние между объективами могло несколько изменяться, если это требовалось. Для освещения негатива служил фонарь с шестью лампами накаливания до 60 *вт* каждая. Освещение производилось через матовое стекло. Проекционными объективами служили два объектива «Индустар» с относительным отверстием 1 : 2 и фокусным расстоянием 50 мм. Объективы могли перемещаться при помощи ползунков по пазам в плоскости, параллельной столу, а также вдоль оси для возможности фокусирования изображения.

Вследствие того, что линейное увеличение проекционной системы было пятикратное, для печати приходилось готовить негативы-стереограммы вполне определенных размеров (линейные размеры негатива должны были быть равными $\frac{1}{5}$ линейных размеров отпечатков). Печатаемая стереоизображения на линзово-растровую пленку форматом 8×10 см, требовалось иметь негативы («правый» и «левый» стереоизображений), равные 16×20 мм. Вполне понятно, что для печати изображений на иной

формат линзово-растровой пленки требовалось бы изготавливать стереонегативы другого размера.

Внешний вид проекционно-копировального аппарата, сконструированного автором для печати автостереоскопических изображений на линзово-растровую пленку, изображен на рис. 124. Этот аппарат имеет два проекционных объектива, две рамки, где помещается пара стереонегативов, и снабжен конденсорной системой, освещающей негативы лучами от одного источника. Для равного освещения обоих негативов применяется один общий источник света. Каждый из негативов рисуется своим объективом на столе аппарата, причем изображения, получаемые от правого и левого негативов, налагаются друг на друга. Регулировка перемещений обоих изображений выполняется при помощи соответствующих перемещений правого и левого негативов. Для таких перемещений негативов служат соответствующие ручки на аппарате. «Правый» и «левый» негативы стереограммы помещаются в проекционно-копировальный аппарат в специальных рамках между матовым стеклом и объективами. Одним объективом на линзово-растровую пленку, помещенную на столе, проектируется «правое», а другим объективом — «левое» изображение.

Линзово-растровая пленка с цилиндрическим растром помещается на столе в зажимной рамке так, чтобы линиятура раstra была направлена перпендикулярно к плоскости, проходящей через оси объективов. Прежде всего выверяется фокусировка изображений в плоскости линзово-растровой пленки (т. е. проверяется резкость получаемого при проекции изображения в плоскости пленки). Для этого поочередно каждый объектив аппарата закрывается крышечкой, и проекция ведется только одним объективом. Чтобы не экспонировать пленку во время фокусирования изображения, на пути лучей устанавливается красный светофильтр, т. е. проекция изображений при наводке на фокус производится красными лучами. Затем точно таким же образом проверяется фокусировка второго изображения стереограммы вторым объективом. После этого на линзово-растровую пленку через красные светофильтры проектируются оба («правое» и «левое») изображения стереограммы. Сдвигом объективов в плоскости, параллельной столу (т. е. пленки), производится совмещение контуров «правого» и «левого» изображений на площади линзово-растровой пленки. В том случае, если изображения не удастся совместить (они, например, повернуты одно относительно другого вокруг вертикальной оси), производится поворот осей негативов для достижения совпадения осей обоих изображений, спроектированных на линзово-растровую пленку. Если обнаружена разномасштабность получаемых изображений в плоскости линзово-растровой пленки, приходится уравнивать масштабы «правого» и «левого» изображений сдвигом объективов в вертикальном направлении. При этом, конечно, нарушается фокусировка изображений. Чтобы компенсировать нарушенную резкость изображения, приходится диафрагмировать объективы.

Чтобы освещенность «правого» и «левого» изображений на линзово-растровой пленке была одинакова, ее проверяют визуально на глаз или более точно измеряют с помощью фотоэлемента, помещаемого на линзово-растровую пленку и освещаемого последовательно то одним, то другим объективом.

Прежде чем производить печать стереоскопического изображения после окончания всех регулировок и подстроек аппаратуры, производится визуальный контроль получаемого стереоэффекта. Для этого оба изображения, «правое» и «левое», проектируются одновременно на поверхность линзово-растровой пленки через красные светофильтры. Совмещенные на линзово-растровой пленке изображения рассматриваются сбоку от проекционного аппарата с расстояния, приблизительно равного 250 мм, т. е. так, чтобы глаза находились на одном уровне с объективами; причем глаза должны находиться в плоскостях, перпендикулярных к линии, со-

единающей объективы и проходящей через центры объективов. Такой визуальный контроль позволяет обнаружить стереоскопичность изображения, получаемого на линзово-растровой пленке. Чтобы получить изображение переднего плана, кажущегося лежащим в плоскости пленки, следует при наводке «правого» и «левого» изображений совмещать проектируемые на пленку изображения этих планов. В этом случае более удаленные планы, конечно, не совмещаются друг с другом и представляются при рассматривании удаленными за плоскость пленки. Но при этом следует проверить, что несовмещенные плаги состоятся на одном горизонтальном уровне.

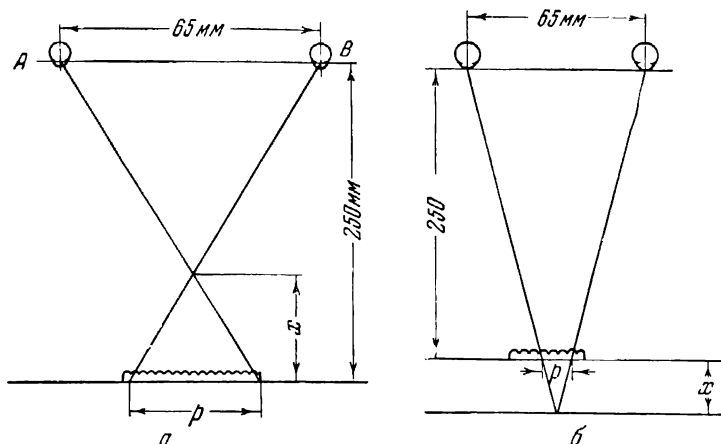


Рис. 125. Схема, поясняющая пространственное расположение стереоскопического изображения, видимого на линзово-растровой пленке, перед пленкой (а) и позади пленки (б)

При желании получить некоторые детали изображения пространственно выступающими вперед от поверхности линзово-растровой пленки, нужно совмещать их в плоскости пленки с передним планом, и именно тем, который желательно получить лежащим в плоскости пленки. Более удаленные планы будут лежать в этом случае за плоскостью пленки. Однако, как показал опыт, получение сильно выступающих вперед (от плоскости пленки) планов затрудняет их рассматривание ввиду того, что глаза аккомодируются на плоскость линзово-растровой пленки, а конвергируются на плоскость выступающего плана, лежащую перед пленкой. Вследствие этого происходит зрительное утомление и нарушается слитное восприятие зрительного образа.

Практически, осуществляя печать стереоскопических изображений, на линзово-растровой пленке с вынесенным вперед передним планом оказывается вполне возможным делать перекрытие «правого» и «левого» изображений на 2 мм и как максимум — на 5 мм. Это соответствует выносу изображения вперед на 10 мм при рассматривании его с расстояния, равного 250 мм. На рис. 125, а А и В — точки зрения глаз, а p — сдвиг. Если сдвиг отпечатков производится с перекрытием, как показано на рис. 125, а, то вынос изображения вперед от пленки будет определяться соотношением $x = \frac{(250 - x)p}{65}$.

При сдвиге на 2 мм изображение выступает вперед от пленки на 7,5 мм, а при сдвиге на 5 мм выступает на 19 мм. Но, как показывает опыт, и удаленные планы нельзя печатать на линзово-растровой пленке с очень большими сдвигами. Сдвиги сопряженных частей «правого» и «левого» изображений в плоскости пленки (для удаленных планов больше 5 мм)

уже не всеми лицами воспринимаются без затруднений. Многие не могут достичь слияния этих двух изображений в единый пространственный образ опять-таки ввиду разрыва аккомодации и конвергации и видят эти два изображения раздельно, т. е. в виде двоящихся контуров. Наблюдаемая глубина стереоскопического пространства за плоскостью пленки приближенно будет равна

$$x = \frac{250}{65} p \approx 3,85 p,$$

при $p = 5$ мм, $x = 19,3$ мм (за пленкой), рис. 125, б.

После наводки на фокус и совмещения проектируемых на линзово-растровую пленку изображений стереограммы ее экспонирование производится путем одновременного открывания обоих объективов проекционно-копировального аппарата. Экспонированную пленку проявляют в обычном позитивном проявителе. Дальнейшая обработка линзово-растровой пленки ничем не отличается от обычной обработки позитивных фотоматериалов, т. е. состоит в промывке, фиксировании, вторичной промывке и сушке материала, в результате чего получают уже готовый отпечаток.

Этот отпечаток на линзово-растровой пленке представляет собой стереоскопическую фотографию, которую можно рассматривать на просвет непосредственно без какого-либо стереоскопа. Такое рассматривание должно выполняться, конечно, только с определенного расстояния и из определенного положения, которое должно соответствовать положению объективов, какое они занимали относительно пленки при печатании на нее изображения.

§ 8. ПОЛУЧЕНИЕ ПАНОРАМНО-СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ФОТОГРАФИЙ НА ЛИНЗОВО-РАСТРОВОЙ ПЛЕНКЕ

Линзово-растровая пленка обладает высокой разрешающей способностью и большой оптической светосилой, поэтому на нее можно разместить не одну пару сопряженных стереоизображений, а значительно больше и таким образом получить панорамно-пространственное воспроизведение изображения.

В принципе фотографирование непрерывной пространственной панорамы на линзово-растровую пленку может быть осуществлено с помощью объектива большого диаметра. Однако техническое выполнение съемки панорамно-стереоскопических изображений решается проще путем фиксации на пленке дискретного ряда стереопар, дающих практически равноценный результат. В этом случае панорамно-стереоскопическое фотографирование может выполняться либо одним фотографическим аппаратом, последовательно передвигаемым на новые точки зрения, либо набором фотоаппаратов, установленных каждый в своей точке зрения, либо специальным фотоаппаратом, делающим одновременно несколько снимков с разных точек зрения. Для съемки неподвижных объектов может быть применен пленочный малоформатный фотоаппарат, например «Зоркий», которым производится последовательно ряд снимков с нескольких точек зрения. Все снимки делаются на одинаковом удалении от объекта и на одном уровне, для этого «Зоркий» сдвигается каждый раз по горизонтальной прямой нормально к главной оптической оси объектива.

Для фотографирования подвижных объектов автором был разработан специальный пленочный фотоаппарат с несколькими объективами. Этот фотоаппарат представляет собой малоформатную пленочную камеру, на передней части которой крепится несколько объективов, каждый из которых рисует изображение на разных участках пленки (рис. 126). Наводка на фокус всех объективов производится одновременно, с помощью

рычага, поворачивающего на одинаковую величину все объективы. Затвор для всех снимаемых кадров общий — щелевой. После съемки пленка протягивается на приемную кассету в количестве столько кадров, сколько в аппарате имеется объективов.

Автором был также изготовлен специальный съемочный аппарат для фотографирования панорамно-стереоскопических изображений на фотопластинку. Этот аппарат состоит из объективной доски с укрепленными на ней в одном ряду отдельными съемочными объективами, имеющими одинаковое фокусное расстояние и снабженными индивидуальными диафрагмами. Все объективы находятся на одинаковом расстоянии друг от друга, и их оптические оси параллельны. Одновременная наводка на фокус всех объективов достигается перемещением объективной доски вдоль оптических осей обь-

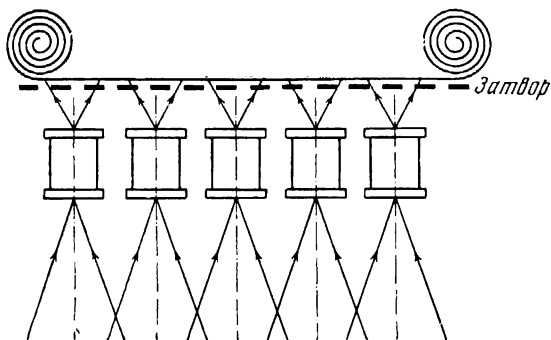


Рис. 126. Принципиальная схема фотоаппарата с несколькими объективами, предназначенного для съемки панорамных стереофотографий

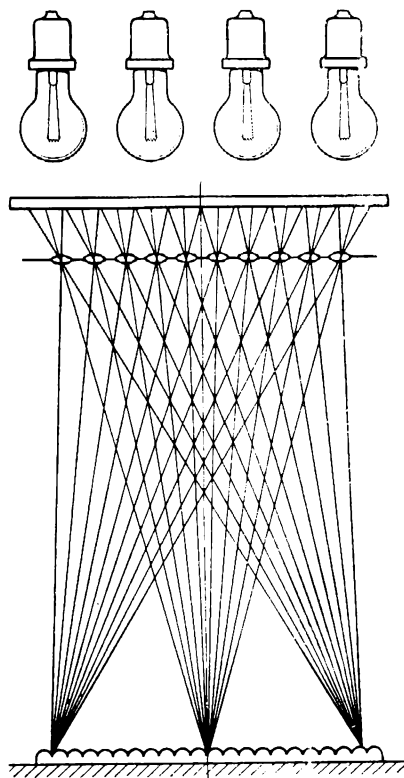


Рис. 127. Схема копирующего аппарата для получения панорамно-стереоскопических изображений на линзово-растровой пленке

ективов. Все объективы рисуют изображения фотографируемого объекта, отличающиеся параллаксом на общей фотопластинке или пленке, помещаемой в специальной кассете с задней стороны аппарата. Для наводки на резкость и кадрирования объекта съемки на место кассеты с фотопластинкой ставится матовое стекло. С этой же целью и с целью визирования объекта съемки во время фотографирования на объективной доске укрепляются еще два объектива, идентичные съемочным, которые разделены нормальным стереобазисом. Позади объективов укреплены зеркала, оборачивающие изображения, чтобы их можно было рассматривать через два окуляра, которые расположены на верхней стенке корпуса аппарата и через которые можно видеть стереоскопически фотографируемый объект.

Экспонирование изображения объекта производится с помощью щелевого затвора, располагаемого между объективами и фотопластинкой. Щелевой затвор работает таким образом, что все объективы открываются и закрываются общей щелью одновременно, т. е. щель расположена параллельно линии объективов.

Этим фотоаппаратом можно производить моментальную съемку одного объекта с десяти точек зрения, расположенных в одном ряду. Аппарат

позволяет применять при съемке различные фильтры и другие фотографические приспособления.

Процесс оптической копировки на линзово-растровую пленку панорамно-стереоскопических фотоизображений с негатива, несущего ряд отдельных сопряженных стереоизображений, должен выполняться с помощью специального аппарата проекционной печати. Этот аппарат представляет собой проекционный фонарь с несколькими объективами, расположенными на одной прямой с равными интервалами. Принципиальная схема его устройства показана на рис. 127. Со стороны фонаря за объективами имеется диапозитивная рамка, в которую должен вставляться негатив с разделенными стереоизображениями панорамограммы. Каждый проекционный объектив рисует свое изображение панорамограммы на линзово-растровой пленке. Все проекционные объективы должны давать одинаковое увеличение проецируемых ими изображений, что обеспечивается одинаковыми их фокусными расстояниями и одинаковым проекционным расстоянием для всех объективов. Каждый объектив закреплен в своей оправе таким образом, что позволяет производить подрегулировочную юстировку его движением в плоскости, перпендикулярной оптической оси.

Линзово-растровая пленка помещается на столике аппарата и обращена гофрированной поверхностью к объективам проекционного аппарата. Процесс печати позитива панорамно-стереоскопического изображения производится следующим образом. Сначала негативные изображения панорамограммы, проецируемые каждым объективом аппарата, накладываются друг на друга в плоскости копировального стола аппарата, что достигается соответственным перемещением каждого проекционного объектива в плоскости, перпендикулярной оптическим осям. При такой регулировке должно быть устранено несовмещение контуров отдельных изображений по их высоте. Затем производится регулировка смещения контуров отдельных изображений по горизонтали, что достигается опять же соответственными перемещениями проекционных объективов вдоль прямой, по которой расположены объективы. Регулировкой достигается совмещение контуров того или другого плана изображения. Совмещенный план будет представляться наблюдателю, рассматривающему панорамно-стереоскопическое фотоизображение, лежащим в плоскости пленки. Более дальние планы будут казаться удаленными за плоскость пленки, а объекты, расположенные ближе этого плана, будут казаться выступающими с пленки вперед. Отрегулированная таким образом аппаратура позволяет приступить к печати панорамно-стереоскопических фотоизображений на линзово-растровую пленку. Печать изображений производится путем одновременного экспонирования всеми проекционными объективами.

§ 9. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЦВЕТНЫХ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ФОТОГРАФИЙ

Для получения цветных стереоскопических изображений может применяться многослойная пленка с цветным проявлением. В настоящее время такая пленка является основой для наиболее совершенного процесса фотографирования цветных изображений. Обычные цветные многослойные пленки имеют строение, показанное на рис. 128. Самым нижним эмульсионным слоем 4, у целлулоидной подложки 5, является слой, чувствительный к красным лучам спектра. Непосредственно на нем лежит слой 3, чувствительный к зеленым лучам. Оба эти слоя чувствительны также к синим лучам. Чтобы предупредить возможность действия на два указанных слоя лучей синей части спектра, поверх этих эмульсионных слоев располагается желтый фильтровый слой 6, не пропускающий синие лучи. Самым верхним эмульсионным слоем 2 является несенсибилизированный слой, чувствительный только к лучам синей зоны спектра.

В состав эмульсионных слоев введены цветные компоненты, которые при проявлении пленки дают окрашенные изображения. Нижний эмульсионный слой 4 в результате проявления образует сине-зеленое изображение, средний слой 3, чувствительный к зеленым лучам, после проявления дает изображение пурпурного цвета, а верхний слой 2, чувствительный к синим лучам, образует желтое изображение.

Техника получения цветных стереоскопических фотографий в данном случае сводится к предварительному получению негативов стереопары на обычной негативной многослойной пленке. Изображение на этой пленке

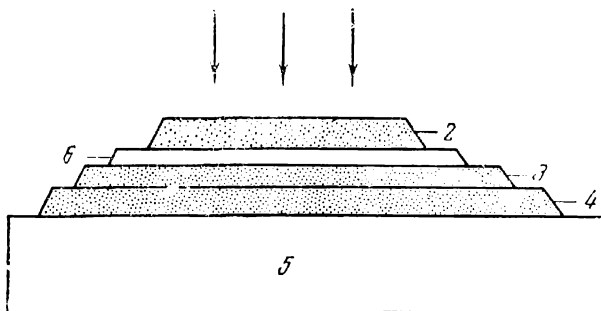


Рис. 128. Схематический разрез цветной многослойной пленки:

1 — падающие лучи; 2 — синий чувствительный слой; 3 — зеленый чувствительный слой; 4 — красный чувствительный слой; 5 — подложка; 6 — желтый фильтровый слой

получается в дополнительных цветах. В дальнейшем печать позитивного цветного изображения осуществляется таким же способом, как и при получении обычных стереоскопических отпечатков или стереоскопических диапозитивов. Различием является только то, что вместо обычного позитивного фотоматериала в данном случае применяется позитивная многослойная бумага или пленка.

Процесс обработки позитивной многослойной фотобумаги ничем не отличается от обработки многослойной позитивной пленки. Печатаемое стереоскопическое изображение на многослойной бумаге можно получать отпечатки для рассматривания в стереоскопе в отраженном свете. В настоящее время многослойная цветная фотобумага выпускается отечественной промышленностью под названием фотоцвет. Изготовленные на ней отпечатки дают очень естественное воспроизведение цветов.

Многослойные цветные фотоматериалы могут быть использованы и для получения естественных цветных автостереоскопических изображений, рассматриваемых непосредственно без стереоскопа. Для получения таких изображений может служить линзово-растровая пленка со светочувствительным слоем, имеющим структуру, подобную структуре обычной многослойной цветной пленки. Однако для правильной передачи цвета линзово-растровая пленка должна покрываться слоями эмульсии, расположенными в обратном порядке по сравнению с расположением на обычной позитивной цветной многослойной пленке, так как экспонирование линзово-растровой пленки производится через целлулоидную сторону, а при фотографировании на многослойные цветные пленки не безразлично, с какой стороны эта пленка экспонируется.

Подходящей для этих целей отечественной пленкой может служить цветная позитивная пленка ЦП-6. У этой пленки синечувствительный

слой, содержащий желтую компоненту, является не верхним слоем, как во всех трехслойных пленках, а нижним. В верхнем, зеленочувствительном слое находится компонента для образования пурпурного красителя. Зональное деление лучей света при печати в позитивной пленке ЦП-6, не имеющей специального слоя, поглощающего синие лучи, осуществляется за счет различной степени светочувствительности двух верхних сенсibilизированных и нижнего несенсибилизированного слоев к лучам синей зоны спектра. Схема печати цветного изображения на линзово-растровую пленку с цветного негатива изображена на рис. 129.

На схеме условно показано, как на многослойном негативе получается изображение объекта в дополнительных цветах. Лучи от объекта, окрашенного в синий цвет, воздействуют только на фотослой (1), чувствительный к синим лучам и окрашивающийся после проявления в желтый цвет; лучи от объекта, окрашенного в зеленый цвет, воздействуют только на фотослой (2), принимающий после проявления пурпурный цвет; лучи от объекта, окрашенного в красный цвет, воздействуют только на фотослой (3), принимающий после проявления сине-зеленую окраску.

Если снимаемый объект отражает более широкий спектр лучей, например сине-зеленую или желтую область спектра, то соответственно будут экспонированы два смежных фотослоя: в первом случае (1) и (2), а во втором случае (2) и (3). Сложенные вместе после проявления (1) желтый и (2) пурпурный слои, представляются красными, так как их комбинация пропускает только красные лучи. Комбинация (2) пурпурного и (3) сине-зеленого слоев пропускает только синие лучи.

На те места негатива, на которые падал еще более широкий спектр света от белого объекта, экспонируются все три фотослоя (1), (2) и (3). Комбинация проявленных этих слоев не пропускает света. На участки негатива, на которые не падал свет (на которые проектировались изображения черных объектов), фотослои не экспонируются, и, следовательно, после проявления они остаются прозрачными, пропускающими большой свет.

Таким образом, полученное на негативе изображение оказывается окрашенным в дополнительные цвета по сравнению с цветами объекта. На рис. 129 можно видеть, как соответственно изменяются цвета объекта на негативе: синий превращается в желтый, сине-зеленый — в красный, зеленый — в пурпурный, желтый — в синий, красный — в сине-зеленый, черный — в белый, белый — в черный.

На схеме показано, как через разно окрашенные участки негатива проходят синий, зеленый и красный лучи, входящие в состав белого света, освещающего негатив при изготовлении с него позитивного отпечатка на линзово-растровой многослойной пленке.

Проходящие через желтый участок негатива зеленые и красные лучи воздействуют соответственно на (2') и (3') фотослои линзово-растровой пленки. Слой (2'), чувствительный к зеленым лучам, окрашивается при проявлении в пурпурный цвет, а слой (3'), чувствительный к красным лучам, окрашивается в сине-зеленый цвет. Таким образом, на данном участке пленки возникает изображение синего цвета.

Красные лучи, проходящие через красный участок негатива, экспонируют на позитиве только слой (3'), получающий сине-зеленую окраску. Синие и красные лучи, проходящие через пурпурный участок негатива, воздействуют на фотослои (1') и (3), окрашивающиеся соответственно в желтый и сине-зеленый цвета, комбинация которых дает зеленый цвет. Лучи, проходящие через синий участок негатива, экспонируют на позитиве только слой (1'), окрашивающийся в желтый цвет.

Синие и зеленые лучи, проходящие через сине-зеленый участок негатива, экспонируют два слоя (1') — желтый и (2') — пурпурный, комбина-

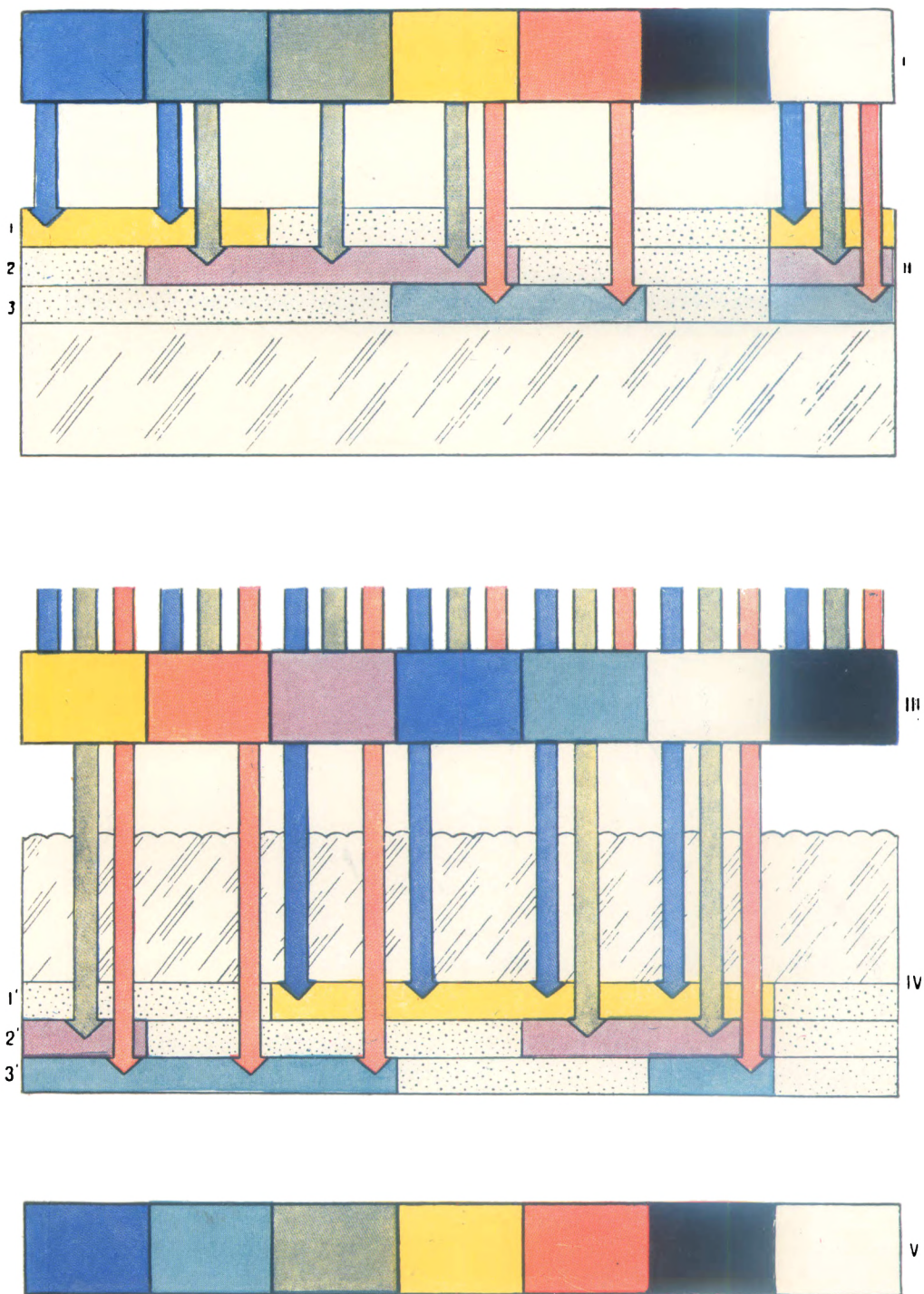


Рис. 129. Схема копировки цветного негатива на позитивную многослойную пленку

ция которых дает на позитиве красное изображение. Лучи, проходящие через прозрачный участок негатива, экспонируют все три слоя позитива, создавая изображение черного цвета. Участки позитива, на которые не падал свет, остаются светлыми, прозрачными.

Таким образом, на позитиве происходит вторичное обрачивание цветов. Изображение на позитиве оказывается окрашенным в дополнительные цвета по сравнению с изображением на негативе. Благодаря этому на позитивном изображении восстанавливаются натуральные цвета объекта.

Оптическая печать на линзово-растровую многослойную пленку, естественно, производится через целлулоидную подложку, на внешней поверхности которой нанесен растр. Негатив экспонируется с эмульсионной стороны.

Цветная позитивная пленка на стороне, обратной эмульсионной, имеет противореольный слой, содержащий коллоидный углерод. При изготовлении на этой поверхности линзового растра противореольный слой должен предварительно смываться растворителем. Фотопечать автостереоскопических изображений на цветную позитивную линзово-растровую пленку может производиться проекционно-копировальным аппаратом с двумя объективами, так же как и обычная печать автостереоскопических изображений на линзово-растровую пленку. Конечно, для печати цветных автостереоскопических изображений должна использоваться негативная стереограмма, сфотографированная на многослойную цветную негативную пленку.

Можно еще упомянуть о возможности непосредственного получения цветной позитивной стереограммы во время съемки, если производить фотографирование на цветную многослойную пленку с обращением. Такая цветная стереограмма является диапозитивом, который можно рассматривать в стереоскоп на просвет.

Глава V

СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ КИНЕМАТОГРАФИЯ И ТЕЛЕВИДЕНИЕ

§ 1. Развитие техники стереоскопической кинематографии. § 2. Съемка стереоскопических кинофильмов. § 3. Проекция стереоскопических кинофильмов. § 4. Безочковая стереоскопическая кинопроекция по системе С. П. Иванова. § 5. Дальнейшее усовершенствование техники стереоскопической кинематографии. § 6. Стереоскопическое воспроизведение изображений с широкоэкранном и панорамном кино. § 7. Стереофоническое звукопроизводство. § 8. Принципы осуществления стереоскопического телевидения. § 9. Системы цветного стереоскопического телевидения.

§ 1. РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ КИНЕМАТОГРАФИИ

Почти одновременно со стереоскопической фотографией и рассматриванием стереоскопического изображения в стереоскоп возникла стереоскопическая проекция. Уже в 1858 г. Альмейда воспроизводит стереоскопическое изображение на экране, доступное наблюдению одновременно для группы людей. Он предложил проектировать стереоскопическую картину так, чтобы два изображения стереограммы, соответствующие точке зрения правого и левого глаза, налагались друг на друга на экране и при проекции окрашивались одно в красный, другое в зеленый цвет. Зритель при этом должен был надевать очки, имевшие цветные стекла, при помощи которых он фильтровал изображения, соответственно предназначенные для правого и левого глаза. Рассматривая эти изображения отдельно правым и левым глазом, зритель видел стереоскопическую картину. Это было первым осуществлением «анаглифической» проекции. Еще до появления кинематографии этот метод был реализован в виде теневой проекции движущихся действительных объектов. Такое воспроизведение получило название «чудеса теней».

Однако уже в 1903 г. как за границей, так и у нас в России начались попытки просцировать анаглифическим методом фильмы, снятые двумя аппаратами с двух точек зрения. Эти попытки вначале оказались неудачными, и впервые успешная демонстрация кинофильмов посредством анаглифического метода была осуществлена изобретателем кинематографии Луи Люмьером во Франции только в 1925 г. Одновременно с анаглифическим методом проекции стереоскопических фильмов делались неоднократные попытки демонстрировать стереоскопические фильмы эклиптичным и поляризационным методами, а также методами с использованием различного рода стереоскопов для рассматривания стереоскопических изображений на экране. Ряд очень удачных разработок в этой области был выполнен в Советском Союзе.

Одним из первых в этой области начал работу А. К. Кауфман, проводивший опыты по реализации стереоскопической проекции с помощью специальных стереоскопов. Осуществленные им в начале тридцатых годов экспериментальные установки давали возможность зрителям наблюдать через индивидуальный прибор спроектированное на экран стереоскопическое изображение. Экспериментальные установки для осуществления

стереоскопической кинопроекции эклипсным методом были разработаны у нас С. Михайловым и С. Брюхоненко. В СССР анаглифический метод стереоскопической кинопроекции в аддитивном варианте был осуществлен Н. Анощенко, а наиболее совершенный субтрактивный вариант этого метода был разработан Е. М. Голдовским и А. Л. Левингтоном в 1936 г. Первая разработка поляризационного метода стереоскопической кинопроекции с применением отечественных поляроидов была проведена в НИКФИ автором в 1938 г.

Осуществление стереоскопической кинопроекции всеми этими методами имело существенный и принципиальный недостаток, заключавшийся в том, что зритель для наблюдения стереоскопического эффекта должен был пользоваться индивидуальными оптическими устройствами. Хотя воспроизведение стереоскопического изображения в разработанных системах проекции было вполне удовлетворительным, а в некоторых случаях отличным, упомянутый недостаток не давал возможности широко реализовать эти методы. Было очевидно, что правильное решение задач стереоскопической кинопроекции может быть найдено лишь путем разрешения проблемы безочкового демонстрирования стереоскопического изображения в кинотеатре.

Мысли многих изобретателей были направлены на решение этой проблемы. В 1925 г. Д. Какабадзе предложил особый гофрированный металлический экран, состоящий из отдельных граненных ячеек, которые должны были отражать лучи проецировавшихся на него двух изображений сепарированно для глаз зрителя. Однако неудачная форма выполненных им растровых элементов экрана практически не позволила успешно решить эту задачу в широком масштабе.

Одновременно с работами советских изобретателей по реализации безочковой стереоскопической кинопроекции проводились исследования и за границей. В США наибольших успехов в этом отношении достиг Г. Айве, в Бельгии — Э. Ноайон. Они показали принципиальную возможность осуществления демонстрации стереоскопических фильмов, но практически реализовать свои идеи им не удалось. Их проекты оказались очень сложными для практического осуществления, и только у нас в Советском Союзе осуществилась возможность претворить их в жизнь.

Впервые стереоскопическое кино без очков с использованием радиально-растровых перспективных стереоэкранов было продемонстрировано в СССР по методу, предложенному изобретателем С. П. Ивановым в 1935 г. В 1937 г. по этому методу была осуществлена экспериментальная установка для демонстрации стереоскопических фильмов. После съемки кинофильма «Концерт», специально предназначенного для демонстрации по этому методу, 4 февраля 1941 г. в Москве был открыт первый стереокинотеатр «Москва». Открытие его явилось крупным шагом в массовой реализации стереоскопического кино. Во время войны стереокинотеатр прекратил свое существование, но с начала 1947 г. в Москве был создан другой стереокинотеатр в помещении бывшего кинотеатра «Востоккино». Оборудование его было значительно усовершенствовано. Вместо металлического стереоэкрана с щелевым растром был установлен светосильный стереоэкран с линзовым растром. В настоящее время такие кинотеатры открыты во многих городах Советского Союза — в Киеве, Ленинграде, Астрахани и др.

Стереоскопическое воспроизведение изображений в кино усиливает реалистичность кинематографического образа. Очевидно, когда образы на экране делаются пространственными и более реальными, зритель получает большое эстетическое удовлетворение от картины. Крупные кинорежиссеры и искусствоведы С. М. Эйзенштейн, Г. В. Александров, А. Л. Птушко, Н. В. Экк высказывали мысль, что дальнейшее развитие кинематографии непременно должно привести к стереоскопической

форме кинематографического изображения. Кинематографические образы должны не только стать живыми, с естественными цветами, но и должны обладать пространственностью.

Одновременно с развитием стереоскопического кино совершенствуется и техника пластического воспроизведения кинофильмов. Широкоэкранное кино, а в последнее время панорамное кино с большим экраном вовлекают зрителя в действие, происходящее на сцене, создают такую выразительную реалистичность кинематографического образа, которая начинает соперничать с выразительными средствами стереоскопического киноэкрана. Однако и техника стереоскопического кино продолжает совершенствоваться: появляются проекты вариоскопического кино с большим и расширяющимся экранами и экраном, постепенно переходящим в архитектурные формы самого зрительного зала. Очевидно, постепенное объединение технических средств пластического воспроизведения кинофильмов и техники стереоскопического показа приведет к созданию еще более эффективных форм реалистического воспроизведения пространственных образов в кино.

До недавнего времени зритель в кинотеатре слышал звучание, исходящее из одной точки экрана, независимо от того, в какой части последнего находится звучащий объект, что снижало впечатление естественности, слитности звуковой и изобразительной части фильма. При существующей сейчас записи с помощью нескольких электроакустических трактов звук становится слышимым, как бы исходящим из той точки экрана, где находится звучащий объект. Такое многоканальное стереофоническое звуковоспроизведение в панорамном и стереоскопическом кино создает новую ступень в развитии выразительности кинематографического образа, который начинает жить в пространстве зрительного зала рядом со зрителем.

Развивающаяся техника телевидения в стремлении достичь большей реалистичности воспроизводимого зрительного образа следует по стопам кинематографа и начинает осваивать воспроизведение цветности и стереоскопического изображений. Стереоскопичность телевизионного изображения благодаря рассматриванию его зрителем со сравнительно небольших расстояний несомненно окажется еще более выразительной, чем в кино.

§ 2. СЪЕМКА СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ КИНОФИЛЬМОВ

Съемка стереоскопических кинофильмов производится аналогично стереоскопическому фотографированию. Стереоскопические фильмы могут быть сняты на две отдельные пленки, несущие одна правые, другая левые изображения стереограммы. Фильм может быть снят и с размещением обоих сопряженных изображений на одной общей пленке. Каждый из этих способов съемки имеет свои преимущества и свои недостатки. Ниже мы рассмотрим некоторые особенности обоих видов съемки.

Так же как и при стереоскопическом фотографировании, выполнение стереокиносъемки может производиться либо специальной киносъемочной аппаратурой с двумя объективами, либо двумя соединенными вместе киносъемочными аппаратами, либо одной обычной киносъемочной камерой с объективом, снабженным специальной оптической насадкой, позволяющей получать на пленке одновременно два сопряженных изображения стереограммы. Остановимся вначале на съемке стереоскопического фильма специальной киносъемочной аппаратурой с двумя объективами.

В качестве примера рассмотрим один из первых отечественных аппаратов, сконструированный В. И. Омелиным (рис. 130). Эта киносъемочная камера предназначена для съемки стереоскопического фильма на две пленки. Принципиальная схема устройства этой камеры изображена на рис. 131. На схеме O_R и O_L обозначают правый и левый съемочный объективы. Лучи, идущие через эти объективы, попадают на прямоугольные

призмы P_1 и P_2 полного внутреннего отражения. Отклоняясь этими призмами на 90° от своего первоначального направления, лучи идут дальше навстречу друг другу и попадают каждый на свою пленку, расположенную посередине между этими призмами. Пленки сложены вместе целлулоидной стороной друг к другу. Таким образом, лучи попадают на эмульсионную сторону одной и другой пленки. От правого объектива лучи попадают на пленку R , а от левого объектива — на пленку L . При соответствующей наводке на фокус на пленках получаются сопряженные изображения снимаемого объекта. Эти изображения составляют нормальную стереограмму.

Чтобы пленки не засвечивались паразитными лучами, между ними находится непрозрачный экранчик. Движение обеих пленок при работе киносъемочной камеры осуществляется при помощи одного общего рейфферного механизма, продергивающего обе пленки при смене кадров одновременно. Посредством этой камеры выполнялась экспериментальная

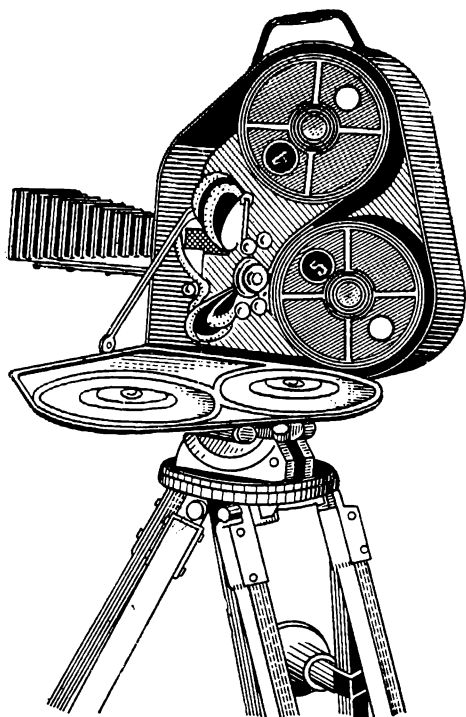


Рис. 130. Общий вид двухобъективной стереоскопической киносъемочной камеры

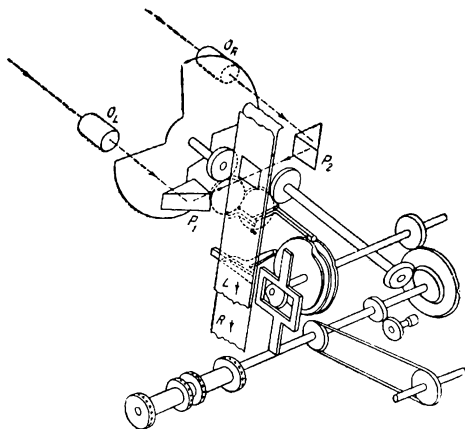


Рис. 131. Принципиальная схема устройства двухобъективной стереоскопической киносъемочной камеры

съемка ряда стереофильмов, например экспериментального фильма «Выходной день в Москве», снятого в 1940 г. режиссером А. Л. Штунко и оператором Н. С. Ренковым совместно с автором.

В производственном отношении оказалось удобным выполнить стереоскопическую съемку фильма на две пленки с помощью двух обычных киносъемочных аппаратов, соединенных вместе. Такое соединение двух киносъемочных камер, предназначенных для съемки цветных фильмов по методу цветофилтрации, было применено автором перед началом Великой Отечественной войны для съемки экспериментального цветного стереофильма. Две съемочные камеры устанавливались на одном общем штативе и снабжались оптическим устройством, сближающим главные оптические оси съемочных объективов до нормального или любого другого заданного базиса. Вследствие возможности поворота крайних зеркал вокруг вертикальной оси при помощи этого устройства можно было также осуществлять конвергенцию главных оптических осей объективов на разноудаленные объекты. При съемке стереофильма двумя камерами через это устройство объектив каждой камеры снимает изображение на отдельную пленку со

своей точки зрения. Оптические оси съемочных объективов могут быть сконвергированы на том или ином снимаемом объекте в зависимости от удаленности его от камеры. Работа съемочных камер автоматически синхронизируется. Правая камера дает фильм с правыми изображениями, а левая — с левыми изображениями. Каждый из снятых фильмов может демонстрироваться в отдельности как обычный фильм на нормальной кинопроекторной аппаратуре. Благодаря этому такая система съемки позво-

ляет наряду со съемкой стереоскопического фильма получать обычный нестереоскопический вариант.

В 1940 г. в СССР впервые этим методом была произведена съемка трехцветного стереоскопического фильма. Этот фильм снимался при участии автора режиссером Н. В. Экк и оператором Ф. Проворовым с помощью двух съемочных камер ЦКС-I, соединенных вместе. Общий вид этих камер показан на рис. 132. Для сближения оптических осей съемочных объективов этой камеры до 100 мм перед объективами устанавливалась оптическая насадка. При съемке цветного стереоскопического фильма одновременно экспонировались шесть цветофильмовых пленок, каждые три из которых являлись частичными изображениями одного из сопряженных

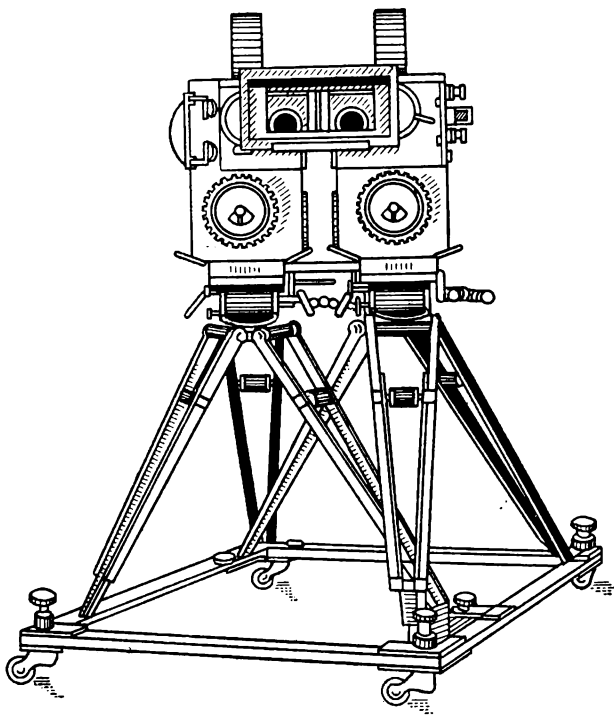


Рис. 132. Общий вид соединенных вместе киносъемочных камер ЦКС-I для съемки цветного стереофильма

изображений стереограммы. Печать цветного фильма на две пленки производилась методом гидротипии. В результате этой печати получались две цветные пленки, содержащие одна правые, а другая левые кадры стереограммы.

Съемка стереоскопического фильма на одну пленку, содержащую правые и левые кадры изображений, может выполняться при помощи особых оптических устройств, поочередно экспонирующих правые и левые изображения. В этом случае правые и левые кадры изображений располагаются в чередующемся порядке. Для съемки двух сопряженных изображений стереограммы на одну пленку могут быть применены специальные кинокамеры с двумя съемочными объективами или обычные однообъективные кинокамеры, снабженные особыми оптическими насадками, состоящими из призм или зеркал.

Одна из удачных конструкций зеркальной насадки была предложена для съемки стереоскопических кинофильмов С. П. Ивановым. В предложенной им схеме (рис. 133) перед объективом съемочного аппарата ставятся два зеркала S_R и S_L , образующие друг с другом небольшой угол в горизонтальной плоскости. В результате такого поворота зеркал объектив фотографирует снимаемый объект как бы с двух точек зрения. Пучок лучей, входящий в объектив через зеркало S_R , рисует на пленке правое изо-

бражение R , которое могло бы быть снято аппаратом, помещенным в точке O_R , а пучок лучей, входящий через зеркало S_L , рисует на пленке левое изображение L , которое могло быть снято аппаратом из положения O_L . Таким образом, на пленке фиксируются одновременно на площади одного кадра два сопряженных изображения стереограммы, правое — R и левое L . Каждое изображение рисуется половинным пучком лучей, входящих в объектив камеры, и занимает половину ширины кадра.

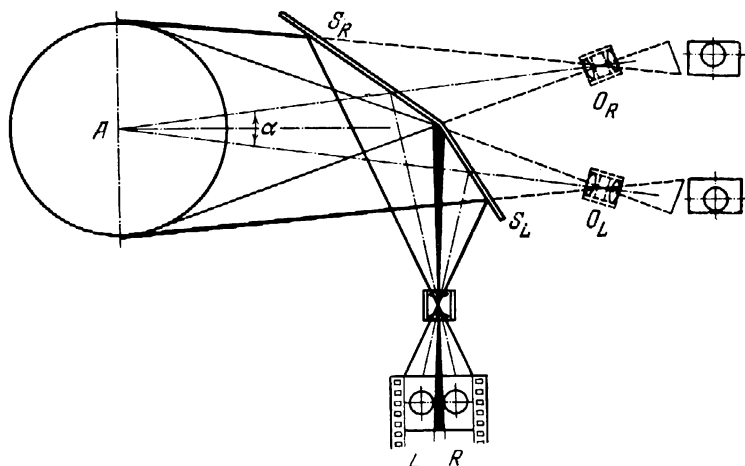


Рис. 133. Схема зеркальной стереонасадки С. П. Иванова для съемки стереокинофильмов однообъективной кинокамерой

При съемке на нормальный формат 35-мм пленки изображения стереограммы получаются в виде вытянутых по высоте прямоугольников. Посередине кадра частичные изображения стереограммы несколько налагаются друг на друга, образуя вуалированную дорожку шириной около 2 мм. Чтобы полезнее использовать эту часть кадра во время съемки, ее кашируют, а затем при печати позитива на этой части кадра размещают дорожку фонограммы. При помощи такой оптической системы в 1940 г. на Московской киностудии «Союздетфильм» режиссером А. П. Андреевским и оператором Д. В. Суренским был снят первый стереоскопический фильм «Концерт», демонстрировавшийся безочковым методом. Позднее С. П. Ивановым было предложено более выгодное размещение сопряженных изображений стереограммы на большей площади пленки с уменьшенным числом перфораций. При применении пленки с уменьшенным в четыре раза количеством перфораций ширина каждого сопряженного изображения стереограммы может быть значительно увеличена, а формат стереоскопического изображения может быть получен квадратным. На пленке этого формата с 1945 г. выполнялась на студии «Стереосфильм» съемка фильмов «Робинзон Крузо» и «Машина № 22-12».

При съемке фильма с помощью стереонасадки, предложенной С. П. Ивановым, изменение величины стереобазиса достигается путем удаления зеркал от объектива. При удалении зеркал от объектива вдоль оптической оси съемочный базис увеличивается, при приближении зеркал к объективу базис уменьшается. Путем поворота зеркал вокруг вертикальной оси, проходящей на стыке зеркал, может быть изменен угол конвергенции оптических осей для правого и левого изображений стереограммы. Эти особенности зеркальной стереонасадки делают ее достаточно удобной для применения при съемке самых различных объектов. Однако существенным недостатком съемки с помощью двухзеркальных стереонасадок является наличие особого рода искажений в изображениях, снимаемых через

зеркала. Эти искажения приводят к тому, что сопряженные изображения стереограммы имеют на значительной части поля изображения и вертикальный параллакс. Вертикальный параллакс соответствующих точек правого и левого изображений приводит к затруднению слитного восприятия стереоскопической картины зрителем. Однако вертикальный параллакс на соответствующих изображениях имеет ощутимую величину лишь в углах кадра, центральная же часть изображения практически лишена этого недостатка. Такого рода искажения приводят к деформации наблюдаемого на стереоэкране пространственного изображения. Благодаря наличию вертикального параллакса точек изображения, лежащих в углах

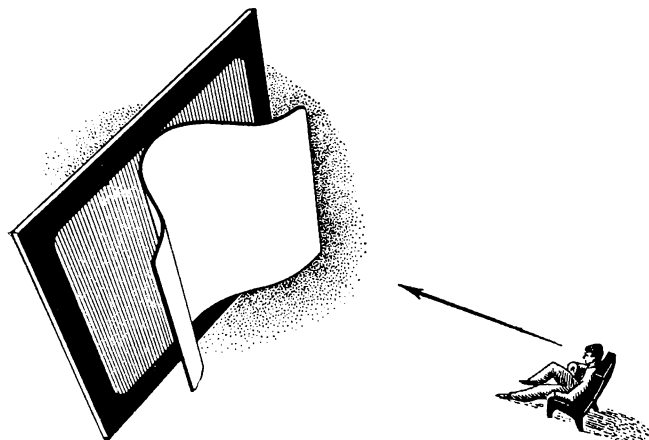


Рис. 134. Характер искривления плоскости экрана при наличии дисторсии стереокадра

кадра, сопряженные вертикальные линии представляются зрителю в разных масштабах для правого и левого глаза. Направления визирных осей правого и левого глаза, фиксирующих сопряженную точку изображения, лежащую, например, в плоскости экрана, уже не пересекаются в плоскости экрана. Это вызывает кажущееся искривление плоскости экрана, примерно изображенное на рис. 134.

На основании всестороннего исследования различных факторов, влияющих на качество воспроизведения стереофильма, в настоящее время Всесоюзным научно-исследовательским кинофотоинститутом (НИКФИ) признана наиболее целесообразной система размещения сопряженных изображений стереограммы на нормальной 35-мм киноплёнке в виде двух следующих друг за другом стандартных кадров размером 16×22 мм. Такое размещение стереокадров на плёнке, предложенное Н. Б. Бернштейном и А. Г. Болтянским, оказалось очень рациональным, так как, помимо улучшения качества воспроизведения стереоскопического изображения привело к большим удобствам при производстве стереофильма, обеспечив возможность проявления, печати фильмокопий, а также выполнения звукозаписи стереофильмов на существующей стандартной аппаратуре.

Для проекции и съёмки стереофильма с новым размещением стереокадров потребовалась другая аппаратура. В связи с тем, что в принятом варианте стереокадры размещаются один над другим, в киносъёмочной и кинопроекционной аппаратуре необходимо было предусмотреть устройство прерывистого продергивания плёнки на двойной шаг кадра для смены стереопары, т. е. на 38 мм вместо обычных 19. Новая стереоскопическая киносъёмочная камера была создана на основе советской киносъёмочной камеры типа ПСК-21. В этой камере соответствующим образом был переделан механизм протягивания плёнки, установлен обтюратор увеличенных размеров для одновременного перекрывания кадров стереопары и укреплен оптический блок с двумя съёмочными объективами и призмёнными устройствами для получения горизонтального съёмочного базиса. Схема устройства оптического блока с двумя объективами и отклоняющими призмами представлены на рис. 135.

Лучи света от объекта съемки, входя в призму 1, падают на зеркальную грань *a*, отражаются от нее ко второй зеркальной грани *b*, отразившись от которой попадают в объектив 2. Объектив проектирует одно изображение стереопары на пленку 3. Второе изображение стереопары проектируется на пленку несколько ниже вторым объективом, снабженным такой же призмной системой. В зависимости от размеров и положения применяемых призм можно производить съемку двух изображений с различными базами, а меняя объективы, менять масштаб съемки и ширину поля зрения. В комплект стереокиносъемочной камеры ПСК-С входит набор призмных насадок, обеспечивающий базы

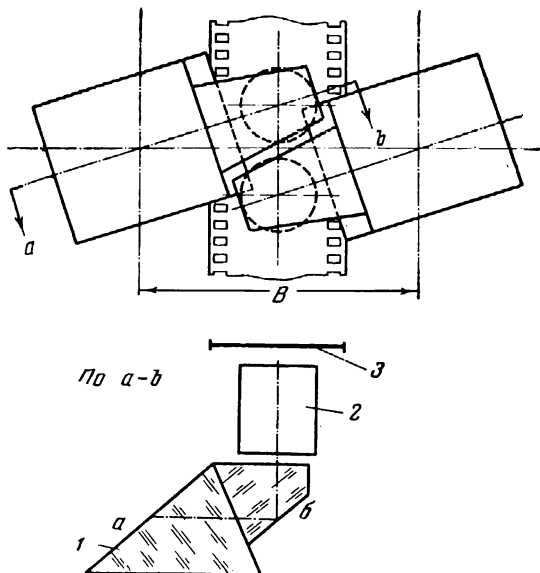


Рис. 135. Схема двухобъективного блока стереокиносъемочной камеры ПСК-С

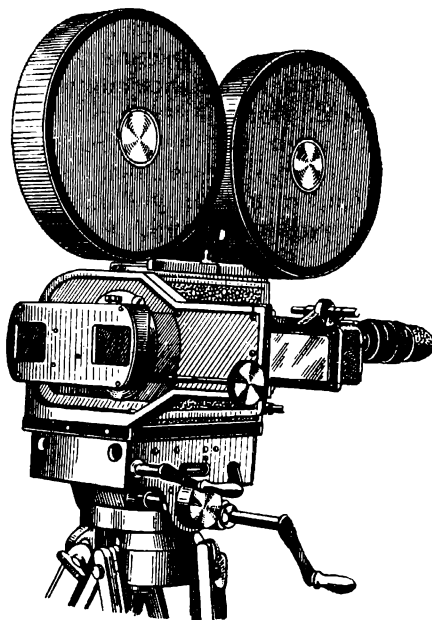


Рис. 136. Стереокинокамера ПСК-С

съемки 38, 48, 65, 93 и 130 мм. В камере могут применяться объективы с фокусными расстояниями 35, 50 и 75 мм. Каждая пара объективов снабжена приспособлениями, которые позволяют одновременно наводить их на фокус и диафрагмировать. В конструкции предусмотрена также возможность перемещения обоих объективов по горизонтали.

На рис. 136 показан общий вид первого образца отечественной стереокиносъемочной двухобъективной камеры ПСК-С, которой в настоящее время производятся все съемки стереоскопических фильмов. В получаемом стереофильме правое и левое изображения стереопары располагаются одно над другим в виде двух стандартных кадров. Фонограмма для воспроизведения звука записывается в виде дорожки, расположенной, как в обычном фильме, сбоку от изображения кадров. Для удобства выполнения стереоскопических киносъемок камера снабжена стереолупой, разработанной по идее А. Г. Болтянского и Н. А. Овсянниковой. Стереолупа позволяет во время съемки видеть пространственную компоновку кадра и правильно компоновать в пространстве мизансцены непосредственно во время репетиций.

По оптической схеме стереолупа представляет собой сочетание системы бинокулярной лупы и стереоскопа. Такая схема позволяет получать пространственное увеличенное прямое изображение с двух действительных перевернутых изображений снимаемых кадров, которые создаются

двумя съемочными объективами на матовом стекле или на пленке. Кроме объемного изображения снимаемой сцены, оператор при помощи такой лупы видит и расположение снимаемого пространства относительно плоскости рампы, т. е. той плоскости, в которой располагаются объекты съемки, воспроизводимые при проекции в плоскости экрана.

При выполнении съемок стереоскопического фильма крайне существен выбор наиболее правильной величины съемочного стереобазиса, так как при малой величине его изображения, воспроизводимые на экране, будут иметь слабозаметный рельеф. При большой же величине стереобазиса рельеф воспроизводимого стереоскопического изображения может оказаться значительно утрированным, а при некотором превышении предельного значения величины стереобазиса горизонтальные параллаксы проектируемого стереоизображения на экране могут оказаться настолько большими, что зритель не сможет совместить оба сопряженных изображения в единый образ. Изображение на экране будет казаться со сдвоенными контурами. Правильная величина съемочного стереобазиса устанавливается расчетным путем. При вычислении величины стереобазиса необходимо знать заранее, с каким увеличением будет воспроизводиться на экране снятый стереокинокадр, чтобы практически вынос изображения вперед с экрана не превосходил $\frac{1}{3}$ расстояния, на которое удален от экрана зритель.

§ 3. ПРОЕКЦИЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ КИНОФИЛЬМОВ

Воспроизведение в кинотеатре объемных пространственных изображений может быть обеспечено только в том случае, если все зрители будут раздельно видеть правым глазом только правые изображения стереофильма, а левым — только левые изображения. Большинство из рассмотренных нами средств сепарации стереоскопических изображений применимо и к воспроизведению стереофильма в кинотеатре. Избирательное видение только правым или только левым глазом соответственных сопряженных изображений стереофильма может быть достигнуто либо посредством обычных стереоскопов, устанавливаемых в кинотеатре, либо путем чередующейся проекции на экран правых и левых изображений и соответственного перекрывания попеременно полей зрения то правого, то левого глаза каждого зрителя с помощью специальных заслонок, обтюраторов или очков.

Такой же результат может быть достигнут при использовании особых селективных очков, пропускающих к правому глазу зрителя лучи только от правого изображения, а к левому глазу — лучи только от левого изображения. В качестве селективных очков для этой цели применяются очки с цветными светофильтрами, использующими для селекции правых и левых изображений принцип цветной сепарации световых лучей, и очки с поляризационными фильтрами, использующими для селекции изображений принцип разделения лучей света, поляризованных в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Наконец, сепарация стереоскопических изображений для правого и левого глаза всех зрителей может быть обеспечена с помощью растровых систем — решеток, устанавливаемых перед экраном, чтобы прикрывать от правого глаза зрителей спроецированные на экран левые сопряженные изображения, а от левого глаза — правые изображения. Применение растровых стереоэкранов позволяет осуществить безочковое наблюдение стереоскопического изображения. Реализация такой возможности открывает широкие перспективы для прогрессивного развития стереоскопической кинематографии.

Стереоскопическая кинопроекция, использующая для сепарации правых и левых сопряженных изображений индивидуальные зрительные

устройства, достигла наибольшего технического совершенства и законченности в поляризационной системе проекции. Практически применить этот метод оказалось возможным в результате освоения оптической промышленности технологии изготовления искусственных поляроидов. Производство искусственных поляроидов было разработано Г. П. Фаерманом в Государственном оптическом институте.

Принципиальная схема этой поляризационной системы, разработанной в НИКФИ автором совместно с М. М. Басовым, представлена на рис. 137. На схеме показана физическая интерпретация формирования пространственного изображения. Правые изображения стереофильма с одной пленки проецируются правым объективом на экран CC , не деполаризующий свет, через поляризационный фильтр, ориентированный таким образом, что он пропускает лучи с горизонтальным направлением колебаний света. Левые изображения с другой пленки проецируются на экран объективом O_2 через другой поляризационный фильтр PF_{\perp} , плоскость поляризации которого ориентирована перпендикулярно к плоскости поляризации первого фильтра, т. е. через этот фильтр проходят лучи света с вертикальным направлением колебаний.

Каждый зритель E видит на экране два изображения — правое $A_R B_R$ и левое $A_L B_L$, наложенные друг на друга. Если же зритель будет смотреть на экран через очки с соответственно ориентированными фильтрами, то он увидит каждым глазом только одно правое или одно левое изображение. Чтобы правым глазом D зритель увидел только правое изображение $A_R B_R$, необходимо ориентировать фильтр PF'_2 , через который зритель смотрит правым глазом, таким образом, чтобы он пропускал только горизонтальные колебания лучей света. В этом случае правый глаз увидит только правое изображение, свет с вертикальным направлением колебаний от левого изображения не дойдет до правого глаза зрителя. Очевидно, что фильтр PF'_1 , помещенный перед левым глазом зрителя, должен быть ориентирован таким образом, чтобы он пропускал свет, имеющий только вертикальное направление колебаний. В этом случае левым глазом C зритель увидит только левое изображение $A_L B_L$. Психофизиологическое слияние в мозгу восприятий двух видимых правым и левым глазом сопряженных изображений стереопары дает пространственный образ изображения AB , не лежащий в плоскости экрана.

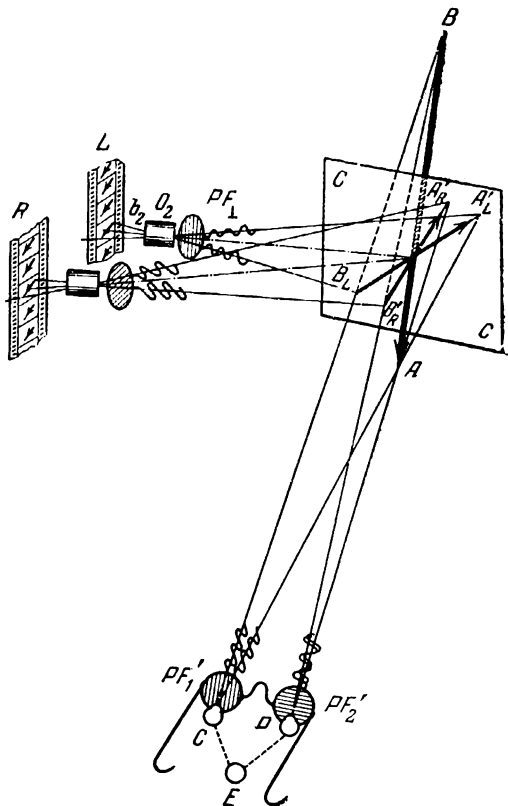


Рис. 137. Схема стереоскопической кинопроекции с использованием поляризованного света

Из рассмотрения этой схемы можно легко уяснить процесс формирования пространственного образа при стереоскопической проекции. Правый глаз видит на экране точку A'_R , правого изображения в направлении зрительной оси DA'_R , а левый глаз — соответствующую этой точке точку левого изображения A'_L в направлении зрительной оси CA'_L . Пересечение зрительных осей правого и левого глаза в точке A , лежащей в пространстве перед экраном CC , определяет видимое зрителем положение слитного изображения. Точно так же видимое правым глазом положение точки B'_R и левым глазом положение соответствующей ей точки B'_L определяет слитное восприятие изображения этих точек в положении B за плоскостью экрана на пересечении зрительных осей DB'_R и CB'_L . Таким образом, два плоских изображения, например стрелки $A'_R B'_R$ и $A'_L B'_L$, спроецированные на экран при сепарированном их рассмотрении правым и левым глазом зрителя, создают пространственный образ этой стрелки AB , уже не лежащей в плоскости экрана.

Поляризационный метод стереоскопической кинопроекции отличается тем, что он может осуществляться в любом кинотеатре на основе существующего оборудования. Разработанные типы экранов, не деполяризующих свет, позволяют производить стереоскопическую проекцию как на отражение, так и на просвет. В последнем случае можно осуществлять стереоскопическую кинопроекцию при дневном свете. В качестве простейшего типа отражательного экрана может служить обычный алюминированный экран, а для проекции на просвет может использоваться в качестве экрана матированное стекло или матированные листы плексигласа и других прозрачных материалов. В осуществленной нами системе стереоскопической проекции одновременно работали два кинопроектора: один из них проецировал фильмы с правыми, другой с левыми изображениями стереограммы. Перед объективом каждого проектора ставился соответственно ориентированный поляризационный фильтр. Для восстановления на просвечивающем экране прямого изображения перед объективами каждого проектора косо укреплялось зеркало наружного серебрения, оборачивавшее проектируемое через него изображение на экране слева направо.

Синхронизация работы двух проекторов достигалась механическим путем. Для этого применялось устройство, представлявшее собой трубчатый телескопически раздвижной валик с пружиной, стремящейся раздвинуть его колена. На коленах валика были укреплены шарниры Гука, через которые он присоединялся к осям ведущего барабана одного и другого проекторов, удерживая их синхронно-синфазную работу. Такое простое устройство обеспечивает надежную синхронизацию работы двух проекторов и позволяет в случае необходимости быстро разъединить их для нормальной нестереоскопической кинопроекции обычных фильмов.

Для опытных демонстраций стереоскопических фильмов на отражающий экран в НИКФИ был разработан кинопроектор особой конструкции с одним общим лентопротяжным механизмом, протягивающим одновременно две пленки по двум самостоятельным фильмовым каналам. Однако в эксплуатации этот проектор оказался менее удобным, чем совместная установка двух нормальных кинопроекторов. Подобного рода установка двойной кинопроекционной аппаратуры в принципе может быть применена и для осуществления безочковой проекции стереофильма с двух пленок на растровый стереоэкран. С другой стороны, стереофильм, снятый на одну общую ленту и предназначенный для безочковой стереопроекции на растровый экран, может воспроизводиться поляризационным методом, если на пути лучей, проецирующих на экран правые и левые изображения стереопары, будут помещены соответственным образом ориентированные поляризационные фильтры.

§ 4. БЕЗОЧКОВАЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ КИНОПРОЕКЦИЯ ПО СИСТЕМЕ С. П. ИВАНОВА

В Советском Союзе безочковая стереоскопическая кинопроекция впервые была публично продемонстрирована в 1941 г. по системе лауреата государственной премии С. П. Иванова. Для осуществления безочковой стереоскопической кинопроекции С. П. Ивановым был применен стереоэкран с щелевым радиальным растром, названный «перспективным растром». Первая опытная демонстрация стереоскопического кинофильма по этому способу была осуществлена еще в 1937 г. В то же время изобретатель совместно со своим помощником Н. Филипповым изготовил перспективный растр на стекле путем фотографического трансформирования обычного параллельного растра, применяющегося в полиграфии. Тогда же под руководством изобретателя инженером Б. Т. Ивановым был сконструирован большой перспективно-растровый стереоэкран размером $2,25 \times 3$ м в виде металлической рамы с натянутыми на нее пучками тонких проволочек. Шаг растровых линий в верхней части экрана был равен 3 мм, а в нижней части — 1,5 мм; ширине щелей между непрозрачными элементами равнялась $\frac{1}{3}$ шага растра и составляла вверху 1 мм, внизу 0,5 мм. Для наблюдения стереокартины зрители располагались в одной плоскости так, чтобы глаза их находились в плоскости избирательного видения. Для этого необходимо устанавливать стереоэкран на такой высоте, чтобы точка схода всех растровых щелей была на одном уровне с глазами зрителей, и на таком же уровне должен находиться объектив кинопроекционного аппарата.

Если зрителей располагать в наклонной плоскости, то при планировке кинотеатрального зала стереоэкран можно устанавливать несколько ниже. В этом случае центр схода растровых полос окажется ниже уровня глаз и для получения наклонной плоскости зон избирательных видений проектор необходимо устанавливать на значительно большей высоте. В первом безочковом стереокинотеатре «Москва» с очень большим экраном (5×3 м) была принята планировка с размещением зрителей в слегка наклонной плоскости. На этой раме было натянуто около 30 тыс. тонких медных проволочек, покрытых черной эмалью.

Чтобы из отдельных проволочек составить сплошную светопоглощающую линию растра, были применены специальные гребенки, которые укладывались на верхней и нижней частях рамы. Группа проволочек от 10 до 15 штук укладывалась в строгом порядке в эти гребенки. У верхней балки экрана устанавливалась гребенка, имевшая большой шаг между зубцами, а на нижней балке меньший шаг; последняя имела несколько другую конфигурацию, чтобы между ее зубцами разместить такое же количество проволочек, какое размещалось между зубцами верхней гребенки. Чтобы образовалась непрозрачная линия растра, сужающаяся книзу, крепление проволочек выполнялось внахлестку. После укрепления всех проволочек нижняя балка оттягивалась, в результате чего частично провисшие при монтаже проволочки вытягивались в прямую линию. Те же проволочки, которые были натянуты сильнее, только несколько растягивались. Такой большой растр пришлось монтировать непосредственно в зале кинотеатра, а затем уже поднять.

За поверхностью растра помещался обычный отражательный экран, который представлял собой металлическую раму с натянутым на нее алюминированным полотном. Особыми кронштейнами она прикреплялась к основной раме растра и при помощи четырех винтов с маховичками по углу рамы могла передвигаться. Благодаря этому можно было регулировать расстояние между отражающей поверхностью и поверхностью растра. Общий наклон стереоэкрана производился при помощи двух болтов, прикрепленных к стене у верхней балки рамы экрана.

Вращая гайки этих болтов в том и другом направлении, можно было изменять общий наклон экрана по отношению к зрителям. Вся установка стереоэкрана была укреплена на двух колоннах в железобетонных перекрытиях зрительного зала. Ширина зрительного зала стереокинотеатра «Москва» была 10 м, длина — 30 м. Плоскость с зонами избирательного видения располагалась на расстоянии 1150 мм от уровня пола. Точка схода растровых полос лежала на расстоянии 2,8 м от нижнего края экрана; при этих условиях расстояние между экраном и растром вверху составляло около 480 мм, а внизу — около 170 мм. Шаг растровых элементов в верхней части экрана составлял 3,45 мм, а в нижней — 1,2 мм. Первый ряд зрителей располагался на расстоянии 10 м от экрана, расстояние до последнего ряда составляло около 29 м. Ширина зон избирательного видения у первого ряда зрителей составляла 80 мм, у последнего ряда 165 мм.

При планировке зала расстояние между креслами было принято 850 мм. В пределах полезной площади зрительного зала удалось установить 24 ряда по 16 кресел в каждом ряду, а всего, следовательно, 384 кресла. На каждое кресло в первом ряду приходилось примерно четыре-пять позиций для правильного наблюдения стереоэффекта, в последнем ряду — около двух позиций.

Чтобы не допустить псевдоскопическое наблюдение демонстрируемого фильма, нормальная пара зон избирательного видения, обеспечивающая правильное стереоскопическое восприятие, располагалась несколько теснее, чем пара зон избирательного видения, создающая эффект псевдоскопического восприятия. Такое более тесное расположение нормальных пар зон избирательного видения достигалось в кинотеатре тем, что проекционный базис, т. е. расстояние между центрами проекции правого и левого изображений, был выбран 120 мм, в результате чего получилось перекрытие на 25—30% одной зоны избирательного видения другой. При принятом проекционном базисе зоны стереоскопического восприятия в первом ряду располагались через каждые 110 мм, в последнем ряду позиции стереоскопического восприятия находились друг от друга на расстоянии 270 мм.

При организации стереоскопической проекции в кинотеатре «Москва» были использованы обычные кинопроекторные аппараты типа КЗС-22. Для увеличения яркости изображения они были снабжены дугами интенсивного горения. Чтобы кинопроекторные аппараты были нормально установлены, т. е. чтобы их объективы были направлены к экрану, для стереоскопической проекции была применена трехзеркальная насадка, изображенная на рис. 138. Эта стереонасадка по принципу действия не отличается от двухзеркальной, применявшейся для съемок стереофильма. Лучи света от двух половин кадра стереофильма идут через объектив к зеркалу S , отразившись от которого попадают на зеркала P_2 и Q . Каждое зеркало несколько смещает лучи и направляет их отдельными пучками на экран. Зеркало P_2 проецирует на экран изображение, предназначенное для наблюдения правым глазом, зеркало Q — предназначенное для наблюдения левым глазом.

Поворот зеркал регулируется микрометричным винтом. Двумя другими винтами зеркала могут перемещаться одно относительно другого при юстировке насадки. Применение для проекции трехзеркальной стереонасадки имеет эксплуатационные удобства, заключающиеся в том, что при снятии или отодвигании дополнительного зеркала с помощью установленных проекторов можно производить обычную стереоскопическую проекцию на полотняный экран, опускаемый в этом случае перед растровым стереоэкраном.

При демонстрации стереоскопических фильмов обычными проекционными аппаратами для воспроизведения звука требовалось применять

специальный звуковой блок или соответственно несколько сдвигать в сторону обычный звуковой блок, так как звуковая дорожка в стереоскопическом фильме была расположена посередине пленки между правым и левым изображениями кадра. В остальном киноаппараты не требовали каких-либо переделок, и их установили в кинотеатре «Москва».

За время существования стереокинотеатра «Москва» с февраля по июнь 1941 г. более 500 тыс. зрителей просмотрели первую стереоскопическую программу «Концерт», снятую режиссером А. П. Андриевским

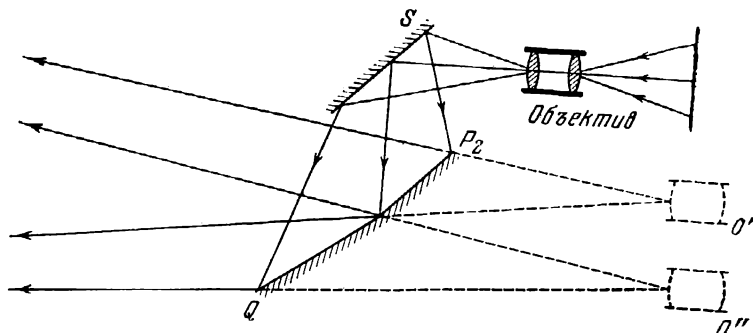


Рис. 138. Трехзеркальная насадка для стереопроекции, предложенная С. П. Ивановым

и оператором Д. Суренским. Судя по огромному количеству положительных отзывов, массовый опыт стереоскопической кинопроекции безочковым методом полностью удался. Однако стереоскопическая кинопроекция, осуществленная в кинотеатре «Москва», имела ряд серьезных недостатков, которые необходимо было устранить, чтобы шире развить массовый стереоскопический кинопоказ.

К числу наиболее существенных недостатков можно отнести следующие. Во-первых, из-за применения щелевого растра происходили большие потери освещенности, которые приходилось компенсировать использованием дуг интенсивного горения. Во-вторых, для зрителей был затруднен выбор правильных позиций. В большой мере этот недостаток происходил потому, что отдельные места зрителей не были согласованы с направлением зон избирательного видения. Если бы удобное положение зрителя в кресле совпадало с зоной лучшего восприятия, то это способствовало бы более быстрому нахождению правильной позиции. Существенный недостаток проекционной установки — непригодность ее для осуществления многостереопарной кинопроекции, позволяющей в принципе получить панорамное воспроизведение стереоскопического киноизображения, создающего иллюзию так называемого оглядывания объектов.

Все перечисленные недостатки стереоскопической кинопроекции имеют значение лишь при использовании стереоэкрана с щелевым растром, при применении светосильного линзового растра они устраняются. Именно поэтому для дальнейшего усовершенствования безочковой стереокинопроекции по системе С. П. Иванова разрабатывался новый светосильный растровый стереоэкран. Первый образец такого экрана был получен им совместно с А. Н. Андриевским в 1943 г. В этом же году была смонтирована и первая экспериментальная установка со светосильным линзово-растровым экраном размером 110×70 см для безочковой стереокинопроекции.

Этот линзово-растровый экран был изготовлен на стекле. Линии растра, расположенные радиально, представляют на нем тонкие прозрачные

конические линзочки, общее количество которых в стереоэкране составляет от 2 до 3 тыс. Линзочки фокусируют падающий на них свет от проектора на поверхность отражающего экрана, установленного за растром. При проекции двух сопряженных изображений на отражающей поверхности экрана получаются два ряда узких полос параллакс-стереограммы. Обратное отражение света от этих полос через конические линзы растра создает в зрительном зале перед экраном зоны избирательного видения, из которых может наблюдаться правое и левое изображения стереокартины. Яркость видимого изображения на линзово-растровом стереоэкране оказывается значительно большей, так как свет почти не поглощается линзовым растром. Поэтому при проецировании на такой экран использовали менее мощный источник света.

Вследствие того, что линзовый растр позволяет получать на отражающей плоскости экрана очень узкие светящиеся плоскости, на такой экран можно проецировать одновременно не два, а значительно больше частичных стереоизображений, не перекрывающих друг друга. Такая возможность сепарации с помощью линзово-растрового экрана значительного количества частичных изображений носит название «емкости стереоэкрана». Емкость щелевого радиально-растрового экрана, установленного в кинотеатре «Москва», не превосходила 2—2,5. Новый линзово-растровый стереоэкран обладает емкостью до 10 и более. Это означает, что на такой экран можно проецировать одновременно до 10 различных изображений, которые в дальнейшем раздельно наблюдаются из различных точек зрительного зала. Проекция большого количества сопряженных изображений позволяет осуществить с помощью линзово-растрового экрана ограниченную панорамную стереопроекцию.

В дальнейшем С. П. Иванову совместно с сотрудниками Б. Т. Ивановым и Е. Ф. Савченко удалось получить линзово-растровые стереоэкраны больших размеров. Один из таких светосильных линзово-растровых экранов размером 3×3 м был установлен в стереокинотеатре, открытом в Москве 20 февраля 1947 г. в помещении бывшего кинотеатра «Восток-кино». Этот стереоэкран представляет собой стекло, покрытое тонким слоем желатины, которому придана линзообразная гофрировка по радиально расходящимся из одного центра лучам, за которым помещен в наклонном положении отражающий экран. Форма каждого линзового элемента этого растра представляет срез с прозрачного конуса длиной около 6 м и диаметром основания около 20—30 см. Ширина такой линзы в самой широкой части составляет 2—3 мм, а толщина среза через самую толстую линию — около 8 мм.

Радиус кривизны поверхности каждой отдельной линзы должен плавно изменяться по всей ее длине, чтобы линза могла фокусировать падающие на нее лучи на наклонно поставленный за ней отражающий экран. В предложенном С. П. Ивановым перспективном растре, в щелевом и линзовом, соблюдаются условия постоянства периода между отдельными элементами растра вдоль любой горизонтальной прямой, секущей этот растр.

Установленный в московском кинотеатре «Стереokino» линзово-растровый стереоэкран оказался в девять раз светосильнее проволочного экрана, т. е. он дает яркость видимого изображения в девять раз больше той, которую зритель видел на проволочном стереоэкране. Яркость изображения, видимого на линзово-растровом стереоэкране, в три раза больше, чем при обычной проекции, ведущейся таким же кинопроектором на полотняный экран. В дальнейшем работы по совершенствованию изготовления линзовых растров, проводимые под руководством С. П. Иванова, позволили создать установленный сейчас в кинотеатре «Стереokino» еще более улучшенный стереоэкран размером 3×4 м с повышенным коэффициентом сепарации изображений.

Наряду с регулярной демонстрацией стереофильмов в этом кинотеатре постоянно ведутся экспериментальные работы по изысканию лучших условий для воспроизведения стереоскопических кинокартин. Вначале были установлены стереокинопроекторы для демонстрации кинофильмов с увеличенными размерами стереокадра при уменьшенном числе перфораций на пленке и с фонограммой, расположенной посередине ленты. Для проекции таких фильмов применялась трехзеркальная насадка, устанавливаемая перед объективами кинопроекторов. Впоследствии при переходе на новый формат стереокадра с размещением двух изображений стереопары на двух последовательных кинокадрах, следующих друг за другом, для проекции фильмов были установлены новые двух-объективные стереокинопроекторы КПТ-С2. Оптическая схема проекционного блока двухобъективного проектора приведена на рис. 139.

Как видно из рисунка, устройство этого блока аналогично устройству съемочного блока, применяемого в стереокинокамере ПСК-С. Благодаря наличию двух призм кадры стереопары, расположенные на фильме один над другим, проецируются на экран, отразившись от двух граней каждой из призм, двумя объективами, разделенными соответствующим горизонтальным базисом.

В начале 1954 г. в Киеве был открыт второй в Советском Союзе стереокинотеатр для безочкового стереопоказа. Он был оборудован новой аппаратурой. Благодаря размещению стереоэкрана в специально устроенной нише, в этом кинотеатре удалось значительно повысить эффект стереоскопичности демонстрируемых фильмов. В настоящее время стереоскопические кинотеатры с безочковой демонстрацией фильмов действуют также в Ленинграде и Астрахани. В открытых кинотеатрах с большим успехом демонстрировались вновь снятые стереофильмы «Робинзон Крузо», «Машина 22-12», «Карандаш на льду», «Майская ночь», «Алеко», «Драгоценный подарок», «Дружок» и другие. Эффект объемности изображения, пространственность сцены производят большое впечатление на зрителей. Демонстрировавшийся короткометражный стереоскопический фильм «Кристалл» показал большие потенциальные возможности для передачи на экране подлинного блеска и игры цветов естественных кристаллов, что не может быть воспроизведено на экране другими средствами.

Сейчас в стереокинотеатрах ведется дальнейшее усовершенствование техники показа стереофильмов. В московском, киевском и ленинградском кинотеатрах установлены разработанные автором совместно с Н. И. Гольцманом специальные визирьы, облегчающие зрителям находить правильную позицию для выбора наилучшей точки зрения. Благодаря более высокому коэффициенту сепарации растровых стереоэкранов повысилось качество стереопоказа, уменьшилась утомляемость зрителей.

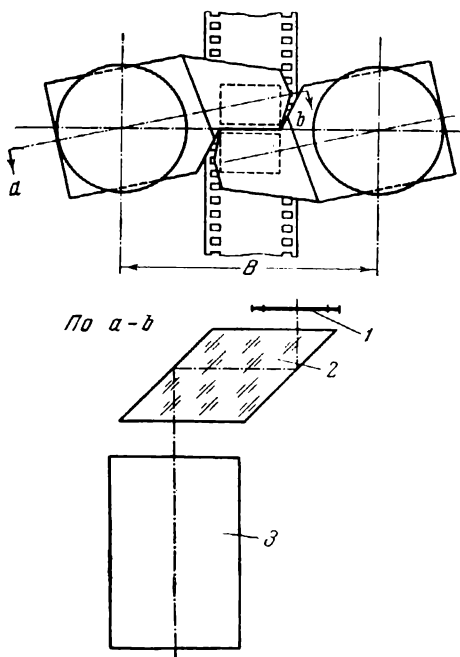


Рис. 139. Схема оптического блока стереокинопроектора КПТ-С2;

1 — фильм; 2 — призма; 3 — объектив

Оценка зрителями демонстрируемых стереоскопических фильмов весьма положительная, но необходимо еще много приложить усилий, чтобы безочковая стереоскопическая кинопроекция в полной мере удовлетворяла запросам зрителей.

§ 5. ДАЛЬНЕЙШЕЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИКИ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ КИНЕМАТОГРАФИИ

Широкая демонстрация стереоскопических кинофильмов выявила целый ряд новых проблем, от решения которых в значительной степени зависит совершенствование техники стереоскопической проекции и улучшение зрительного образа, создаваемого стереокартиной. Одновременно с этим выявилась необходимость улучшить и технику съемки стереоскопических кинофильмов.

В области стереоскопической кинопроекции основным требованием является улучшение восприятия стереоскопической картины. Для этого необходимо решить следующие задачи:

устранить зрительное утомление, происходящее вследствие несовпадения углов конвергенции с аккомодацией глаза зрителя, существующего при современных системах стереопроекции;

предотвратить утомление зрителя, возникающее из-за неполной чистоты сепараций правого и левого изображений, а также зависящее от неодинаковой яркости изображения, видимого правым и левым глазом;

создать условия для наблюдения стереоскопической картины, при которых зритель мог бы свободно находить и удерживать правильную позицию для наблюдения стереоскопической картины, не опасаясь того, что он видит неестественное, т. е. псевдоскопическое изображение;

устранить мешающее действие рамки стереоэкрана, известное под названием «отжимающего действия рамки», которое заключается в том, что предметы, выходящие из экрана в зрительный зал, при соприкосновении с краями рамки экрана психологически отбрасываются зрителем обратно к плоскости экрана и не кажутся вынесенными с экрана вперед.

увеличить размеры стереоскопических киноэкранов, чтобы обеспечить более широкое поле зрения и тем повысить естественность стереоскопического эффекта;

решить вопрос о возможности более близкого, чем сейчас, приближения к зрителям пространственного образа, воспроизводимого при стереокинопроекции, а также получить эти образы менее кулисными, с более естественной округлостью форм;

увеличить используемую полезную площадь в зрительном зале кинотеатра с возможностью размещения зрителей не только в партере, но и на балконах.

Все перечисленные задачи в перспективе могут быть разрешены, и для большинства из них уже намечились пути решения. Однако техника разработки их остается еще сложной.

В области стереоскопической киносъемки также имеется ряд проблем, от решения которых зависит дальнейшее совершенствование киносъемки и получение новых эффектов. К таким проблемам относятся следующие:

нахождение возможности выполнения комбинированных съемок стереоскопического кинофильма. Комбинированные методы широко используются при съемке обычных кинофильмов. К этим методам относятся дорисовка кинокартин, трюковые съемки с проекционным экраном, так называемые рир-проекции, съемка с помощью блуждающих масок на

кинокадрах и т. п. Все они позволяют получать и создавать не только трюки, но и облегчают выполнение постановок, обходясь без дорогих декораций;

освоить производство рисованных стереоскопических фильмов и надписей;

решить вопрос композиции пространственного кинокадра с его делениями на пространственные зоны: внутризальные, экранные и заэкранные.

Все эти проблемы стереоскопической проекции стереоскопической киносъемки имеют свои решения. Эти решения требуют разработки и экспериментальной апробации. Рассмотрим некоторые возможности в этом направлении.

Проблемы улучшения стереоскопической кинопроекции. Уменьшение зрительного утомления при безочковом наблюдении стереоскопической кинокартины достигается в первую очередь путем уравнивания светового баланса в зонах избирательного видения для правого и левого глаза зрителей и путем улучшения чистоты сепарации в этих зонах. Задача уравнивания светового баланса в правой и левой зонах избирательного видения наиболее радикальным образом решается созданием в кинотеатре параллельных зон избирательного видения правого и левого изображений с одинаковой яркостью. Такие параллельные зоны могут быть получены в зале, как уже указывалось, либо с помощью применения интегральных экранов С. П. Иванова и А. Н. Андриевского, либо поляризационного растрового стереоэкрана, а также проекционной многозраковой системы. Поддержание одинаковой яркости в зонах правого и левого изображений — технически сравнительно простая задача, наиболее полным решением которой может служить применение одинаковых источников света или одного источника для проекции правого и левого изображений с необходимостью автоматического (фотоэлектрического) контроля за равномерной интенсивностью обоих потоков.

Более трудно решается задача устранения утомляемости зрителя, происходящей из-за неравенства аккомодационных усилий с усилием, затрачиваемым на конвергенцию глаза. В настоящее время еще не известно ни одной системы стереоскопической кинопроекции как очковой, так и безочковой, которая решала бы положительно эту задачу. Однако и здесь можно наметить некоторые пути. В области безочковой стереопроекции, пожалуй, единственный путь для решения этой задачи — это осуществление интегрального воспроизведения пространственного изображения, при котором каждая светящаяся точка воспроизводимого объекта является как бы излучающей из того места пространства, в котором она находится, и поэтому глаза зрителя рассматривают ее, аккомодируясь и конвергируясь согласованно.

Для улучшения выбора позиции зрителями при рассматривании стереоскопического киноизображения на растровом экране достаточно радикальным решением является установка световых ориентиров под экраном, предложенных автором и Н. И. Гольцманом. Принцип действия таких ориентиров заключается в следующем. Между правой и левой зонами избирательного видения располагается специальный фонарь, например зеленый, который проецирует на край экрана световые полосы, видимые зрителем при правильном положении головы, т. е. когда правый глаз зрителя находится в зоне видения правого изображения, а левый — в зоне видения левого изображения. Этот зеленый сигнал виден обоими глазами зрителя, находящегося в зале, из зоны избирательного видения, частично перекрывающей своими спадами зоны избирательного видения правого и левого глаза. Чтобы предупредить об опасности псевдоскопического видения, другой фонарь, например с красным светом, проецирует на стереоэкран такие же световые сигналы из зоны, находящейся между

псевдоскопической парой видения. В данном случае образуется зона избирательного видения, из которой виден красный сигнал на экране. При неправильном положении зритель видит эти красные сигналы, а отклоняясь в сторону, он сможет найти правильную позицию тогда, когда перестает видеть красные ориентиры и вместо них увидит зеленые. Применение таких световых ориентиров, безусловно, улучшает наблюдение стереокартины, создавая для зрителя более спокойную обстановку и устраняя необходимость постоянных поисков лучшей позиции.

Для устранения отжимающего действия рамки стереоскопического экрана большое значение имеет увеличение размеров самого экрана и соответствующее выполнение композиции стереокинокадра при съемке, а также нахождение особых пространственно-гармоничных форм для самой рамки киноэкрана. Увеличение полей зрения для зрителей в стереоскопическом кинотеатре — очень важная задача, так как она позволяет создать более реальный пространственный образ. Создание широкого поля зрения может быть решено при помощи системы интегральных экранов, софокусно-линейных экранов и других аналогичных систем. Очевидно, при помощи радиально-растровых экранов поле зрения кинокартины для зрителей не может быть расширено значительно.

Такая заманчивая идея, как приближение пространственного образа непосредственно к зрителю, разрешима лишь при осуществлении панорамно-стереоскопической кинопроекции с воспроизведением интегрального изображения. Наконец, решением задачи наиболее полного использования кинотеатрального зала при стереоскопической кинопроекции может служить применение тех же интегральных экранов или радиально-растровых стереоскопических экранов ангармонического класса, которые позволяют создавать зону избирательного видения в разных плоскостях. Полное решение этой задачи может быть достигнуто при осуществлении многостереопарной панорамной стереоскопической кинопроекции, о сущности которой мы говорили ранее.

Проблемы усовершенствования стереоскопической киносъемки. При съемке стереоскопических кинофильмов приходится учитывать совершенно особые условия композиции кинокадра. В то время как на плоском кадре нагромождение предметов может создать неприятное впечатление, затемняющее действие основного объекта, в стереоскопическом кинокадре существенное значение имеет пространственная компоновка. Наглядное представление о пространственной компоновке стереокадра с объектом, находящимся в заэкранной и частично предэкранной зоне, можно получить из рис. 140. Пространственные закономерности внутризального пространства и заэкранные зоны, воспроизводимые в стереоскопическом кинотеатре, неодинаковы. Так, наибольшее впечатление пространственности в заэкранной зоне достигается при наблюдении отдельных предметов, например аллеи деревьев, уходящих вдаль, шоссе или железной дороги. Во внутризальном пространстве предметы, имеющие сплошную протяженность, воспринимаются отчетливее, чем предметы, оторванные друг от друга.

Как показали опыты режиссера А. Н. Андриевского, в заэкранной зоне могут быть помещены перекрывающие друг друга предметы, даже сплошь нагроможденные, без какой-либо перегрузки кадра. Это относится только к так называемой активной части заэкранного пространства, где самая дальняя точка имеет параллакс на экране, еще заметно отличающийся от параллакса бесконечно удаленной точки. В то же время даже малейшее нагромождение предметов во внутризальном пространстве недопустимо: получается хаос, в котором зритель не может разобраться. Чем дальше размещены предметы от экрана в глубину, тем больше вступают в свои права законы плоской кинематографии.

Стереоскопическое кино меняет также ощущение кажущейся величины рамки экрана, а в соответствии с этим меняется и представление зрителя о крупном, общем и среднем планах. Так, например, крупный план создает иллюзию уменьшения размеров экрана, в то же время чем большее пространство охватывается кадром, тем шире разрастается перед экраном не только изображение, видимое зрителем, но и как бы сама рамка экрана. Путем правильного выполнения киносъемки стереоскопического фильма можно в значительной мере противодействовать отжимающему действию рамки при проецировании стереоскопического кинофильма.

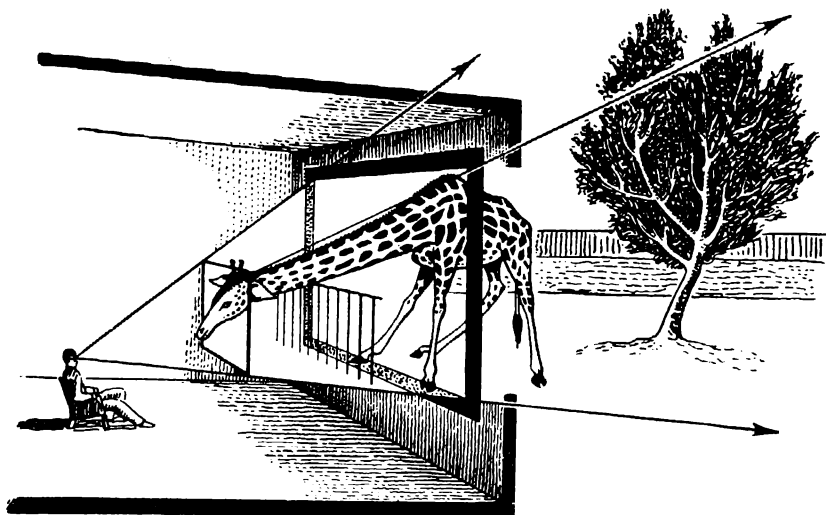


Рис. 140. Компановка стереокадра с заэкраным и передэкраным пространством

Одним из наиболее простых и в то же время действенных средств является затемнение части предмета, касающегося рамки экрана. Это затемнение должно осуществляться постепенно, чтобы края предмета полностью слились с чернотой самой рамки. Так, снимая человека в светлом костюме, невозможно получить на экране стереоскопический образ, который мог бы «перейти» в зал; как только этот образ касается темной рамки экрана, то все изображение как бы отбрасывается назад, к плоскости рамки экрана. Совершенно иначе обстоит дело, когда снимается человек в черных брюках: брюки сливаются с темным тоном рамки, и образ человека может «выйти» с экрана вперед, в зрительный зал. В некоторых случаях преодоление отжимающего действия рамки достигается тем, что выводимые в зал предметы вообще не касаются краев экрана, а как бы висят в воздухе. Такими предметами могут явиться птицы, летающие по зрительному залу, или рыбы, «плавающие перед зрителями», как это демонстрировал фильм «Концерт». Отжимающее действие рамки не распространяется также на тонкие светлые предметы. Специфический закон стереоскопической киносъемки требует еще дальнейшего, более глубокого изучения.

Одной из существенных задач техники стереоскопической съемки является выполнение рисованных стереоскопических кинофильмов. Такими рисованными стереоскопическими кадрами должны быть и надписи к фильмам. Эти надписи, чтобы казаться зрителям «плавающими» в воздухе посередине зала или уходящими вдаль, должны выполняться с соответствующими параллаксами правого и левого изображений. Рисование надписей в стереоскопическом фильме может осуществляться

при помощи специальных аппаратов, например стереографа, предложенного Д. Шварцманом, стереопантографа и других приборов.

Особое значение приобретает применение этих приборов при изготовлении рисованных стереоскопических фильмов-мультипликаций. Изготовление стереоскопической мультипликации — первый шаг в освоении

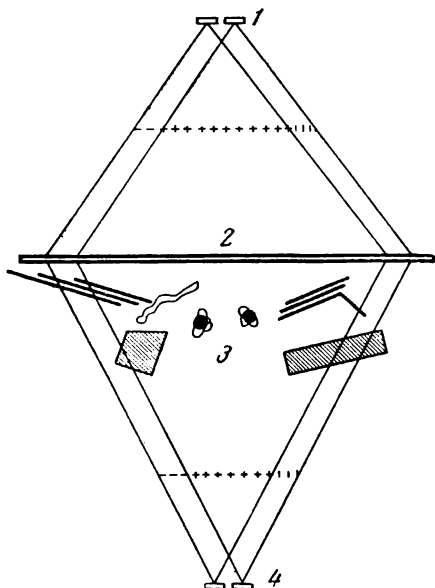


Рис. 141. Принципиальная схема комбинированной съемки стереокартины с применением поляризованного света для проекции фона:

1—стереопроектор с поляризационными фильтрами; 2 — просвечивающий экран; 3 — сцена; 4 — киносъемочная камера с поляризационными фильтрами

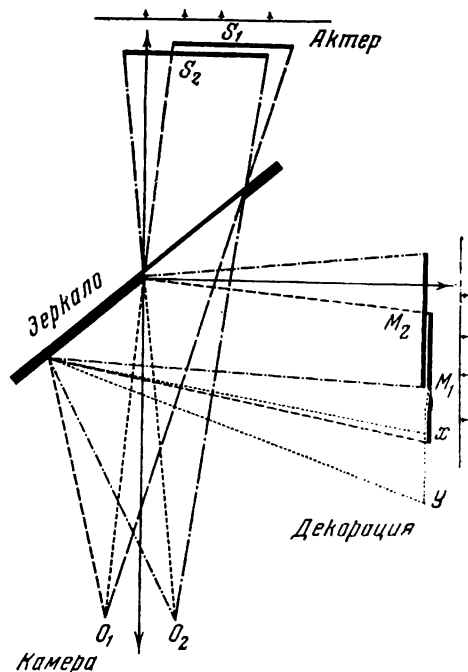


Рис. 142. Схема выполнения стереоскопической комбинированной киносъемки через зеркало с частично снятым серебряным слоем

комбинированных стереоскопических киносъемок. Однако рисованные стереоскопические изображения не могут восполнить всего разнообразия эффектов, которые создают в обычном кинофильме другие методы комбинированных киносъемок. Известные методы комбинированных киносъемок применимы и при выполнении стереоскопической киносъемки, но они требуют специфической техники.

Остановимся коротко на осуществлении метода комбинированных киносъемок, известного под названием «рир-проекция». Этот метод заключается в том, что снимаемый объект находится на фоне полупрозрачного экрана, на который сзади проецируется неподвижное или движущееся изображение фона. Применение этого метода при съемке стереоскопического фильма будет выглядеть следующим образом. Для съемки актера на декоративном фоне необходимо, чтобы проецирование декоративного фона было не плоским, а также стереоскопическим, кроме того, необходимо, чтобы съемочная киноаппаратура могла зафиксировать на киноплёнке не только стереограмму актера, но также и стереограмму этого фона. Наиболее просто эта задача решается путем применения стереоскопической проекции фона поляризационным методом. В этом слу-

чае в качестве экрана должно применяться матированное стекло или другой полупрозрачный экран, не деполяризующий свет, на который проецируются два сопряженных изображения стереограммы фона.

Для разделения частичных изображений фона на правый и левый кадры стереофильма необходимо перед объективами съемочного аппарата или непосредственно перед пленкой устанавливать поляризационные светофильтры, пропускающие к правому кадру лучи только от правого частичного изображения фона, а к левому — от левого частичного изображения фона. На рис. 141 показан принцип выполнения такой комбинированной стереоскопической киносъемки. Комбинированная стереоскопическая киносъемка может, конечно, осуществляться и другими известными методами: методом дорисовки, методом зеркального совмещения актера с объемным макетом и др. Стереоскопическая комбинированная киносъемка через зеркало, имеющее частично снятый серебряный слой, показана схематически на рис. 142. В этом случае стереоскопическое изображение актера совмещается на кадрах фильма с объемной декорацией, видимой через зеркало.

К дальнейшему более перспективному улучшению стереоскопической кинематографии можно отнести широкоэкранное панорамное воспроизведение многостереоскопических изображений. Очевидно, при осуществлении этого метода стереоскопической кинопроекции будет достигнута наиболее полная иллюзия пространственного образа в кинотеатре. Образ будет наиболее естественно восприниматься, сможет приближаться к каждому зрителю, и наблюдение его не будет вызывать зрительного утомления.

§ 6. СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ШИРОКОЭКРАННОМ И ПАНОРАМНОМ КИНО

При расширении рамок киноэкрана вместе с увеличением размеров изображения растет пластичность воспроизводимой на экране картины. Широкий экран позволяет значительно повысить реалистичность воспроизводимых изображений. Такая особенность широкоэкранного кинематографа и создала большой успех этому новому виду зрелища.

Панорамность изображения в широкоэкранном кинотеатре вызывает у зрителей ощущение, как будто они лично принимают активное участие в действии, происходящем на экране, как бы становятся участниками событий, которые видят. Это ощущение возникает при широком поле зрения, когда в восприятии картины участвует периферическое зрение и зритель уголками глаз в известной мере как бы ощущает глубину и пространственность картины. Такое воспроизведение достигается тем, что фильм снимается оптикой с весьма широким полем зрения и показывается на широком экране. Для съемки широкоэкранного фильма на обычную кинопленку применяется так называемая анамарфотная оптика, которая снимает изображение по ширине и по высоте кадра в разных масштабах. Чтобы запечатлеть на обычном кадре широкоэкранное изображение, ширина которого в 2—2,5 раза больше высоты, оно все сжимается по ширине кадра. При воспроизведении сжатый кадр с помощью специальной анамарфотной оптики снова восстанавливается до своей естественной ширины. Сейчас в Советском Союзе действуют десятки широкоэкранных кинотеатров со стереофоническим воспроизведением звука.

Быстрое распространение широкоэкранного кино объясняется как характерными достоинствами даваемого им изображения, так и сравнительной простотой его реализации. Однако еще большая реалистичность картины достигается в панорамном кино, ширина экрана которого в два раза больше широкоэкранного.

Съемка фильмов для панорамного кинотеатра производится тремя самостоятельными киносъёмочными камерами, которые позволяют охватить угол зрения, в три раза больший, чем при съёмке обычного фильма. Проекция панорамного фильма в театре осуществляется тремя аппаратами на большой вогнутый экран (рис. 47). Каждый проектор проецирует свою часть изображения на одну треть экрана. Такой метод проекции вызывает у зрителей «эффект присутствия», который почти физически втягивает их в демонстрируемое на экране действие. Зрители испытывают иллюзию, будто они находятся не в зале театра, а живут вместе с героями фильма на экране. Для сидящих посередине зала изображение шириной до 30 м заполняет все поле видения, границы экрана исчезают, реалистичность показываемых событий чрезвычайно усиливается. Особенно большое впечатление на зрителей производят кадры, снятые с движения, ввиду повышенной пластичности. Немаловажную роль в панорамном кино играет и многоканальная система стереофонического звуковоспроизведения, обеспечивающая иллюзию перемещения звука по экрану и перехода его в зал, когда это обусловлено смысловым содержанием сцены.

Созданная отечественной промышленностью аппаратура для съёмки и проекции панорамных кинофильмов позволила открыть в 1959 г. первые панорамные кинотеатры в Киеве и Москве. Советское панорамное кино, демонстрировавшееся в этом же году на Международной выставке в Брюсселе, было отмечено как наиболее совершенное в техническом отношении. Ввиду большой реалистичности зрительного образа в панорамном кино возникло довольно распространенное мнение, что новый вид кино, собственно, исчерпывает все достоинства стереоскопического и может полностью его заменить. Однако это не так. Новый вид кинематографа действительно воссоздает на экране очень пластичное изображение, но оно все-таки остается для зрителя привязанным к поверхности экрана. Зритель в панорамном кино не может увидеть «вышедший» с экрана и приблизившийся к нему зрительный образ, что остается прерогативой стереоскопического кино. Делая прогнозы на будущее, можно определенно ожидать значительного обогащения зрительного образа в панорамном кино при использовании в нем стереоскопической проекции изображений. Кроме того, у современного вида панорамного кино имеется еще ряд существенных недостатков, большая часть которых могла бы быть устранена применением стереоскопической проекции.

На экране современного панорамного кинотеатра заметны стыки трех изображений, проецирующихся с трех самостоятельных пленок. Эти стыки легко сделать незаметными при перекрывающейся проекции левых и правых кадров стереофильма. Ввиду изогнутости экрана в панорамном кино любая горизонтальная или наклонная прямая линия, спроектированная на экран, превращается в кривую. Причем кривизна этой линии для разных зрителей в зависимости от их расположения в зале различна. Это обстоятельство приводит к значительным перспективным искажениям изображения, наблюдаемого на экране панорамного кинотеатра. Зрители, сидящие посередине зала, ощущают провал горизонтальных уровней в середине экрана и их подъем на краях экрана, сидящие у правого или левого края экрана соответственно видят приподнятым горизонт на правой или левой половине экрана. Эти искажения приводят к тому, что поезд, идущий по ровному участку пути, представляется переползающим на экране по холму, а море — со впадиной посередине и с подъемом на краях экрана. Такого рода перспективные искажения изображения, очевидно, смогут быть устранены только с помощью стереоскопического воспроизведения картины.

Надо заметить, что не только панорамное кино может выиграть от применения в нем стереоскопической проекции, но следует ожидать

совершенно нового эффекта и для стереоскопического изображения, спроецированного на такой большой экран, который применяется в панорамном кинотеатре. Ведь на таком большом экране из поля зрения зрителей устраняется рамка, ограничивающая его края. Таким образом преодолевается отжимающее действие рамки экрана и открывается неограниченная возможность выдвижения с экрана в пространство зрительного зала всего изображения сцены.

Несмотря на заманчивые перспективы, открывающиеся с применением стереоскопического воспроизведения изображений в панорамном кино, эту задачу решить нелегко. Для осуществления стереоскопической проекции необходимы прежде всего специальные экраны, которые для панорамного кино нелегко выполнить требуемых размеров и формы. Особенно большие затруднения возникают при осуществлении безочковой стереоскопической проекции. Как следует из принципа построений перспективно-растрового стереоэкрана, его нельзя сделать достаточно широким и нельзя выполнить в виде кривой поверхности. Поэтому применить перспективно-растровый стереоэкран в панорамном кино невозможно. Лишь некоторый успех в этом направлении можно ожидать от применения составных перспективно-растровых стереоэкранов с перекрывающимися зонами избирательного видения. Но, как показывает анализ, ширина подобных экранов все же остается относительно небольшой, а полезно используемая зона избирательного видения — крайне малой.

Несколько проще обстоит дело с реализацией поляризационной системы стереоскопической проекции в панорамном кино. В широкоэкранным кино такая проекция решается установкой в кинотеатре широкого экрана с металлизированной (алюминиевой) поверхностью, чтобы она не деполяризовала падающий на нее свет. Стереоскопическую проекцию в широкоэкранным кино в техническом отношении, притом с наименьшими световыми потерями, наиболее просто осуществить путем проекции стереофильма двумя проекторами с двух пленок, содержащих одна только левые, другая только правые кадры стереофильма. Для поляризации лучей света, проецирующих изображения, естественно, перед объективами каждого проектора должны устанавливаться поляризационные светофильтры со взаимно-перпендикулярно ориентированными плоскостями поляризации и в соответствии с ориентацией плоскостей поляризации фильтров у очков зрителей.

Сложнее решается задача стереоскопического воспроизведения в панорамном кино, где проекция ведется и так уже тремя проекторами. Конечно, сделав поверхность экрана не деполяризующей свет, в данном случае для проекции стереофильма поляризационным методом можно также применить удвоенное количество проекторов. При этом для устранения заметности «стыков» соседних изображений на экране стереопроекцию можно вести так, как это схематично показано на рис. 143.

На местах «стыков» между кадрами, предназначенными для рассматривания каким-либо глазом (правым или левым) на экране, делаются небольшие разрывы изображения. Эти разрывы не совпадают у правых и левых изображений стереофильма. Благодаря этому на тех участках экрана, где имеются разрывы правого изображения, зритель видит картину левым глазом, а там, где имеются разрывы левого изображения, он видит картину правым глазом. При незначительной ширине разрывов правого и левого изображений стереограммы зритель не ощутит потерю стереоскопичности наблюдаемой картины, и в то же время не заметит разрывов сплошности изображения. Стереоскопическая проекция отрывает воспроизводимое изображение от плоскости экрана и таким образом в значительной мере исправляет перспективные искажения изображений, обусловленные кривизной экрана. Мы знаем, что чем дальше

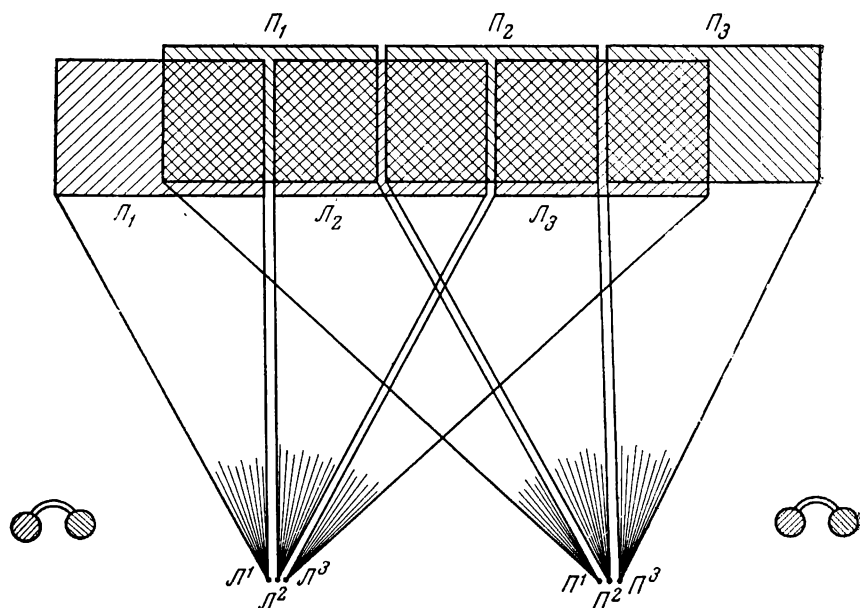


Рис. 143. Схема стереопроекции в панорамном кино на три экрана

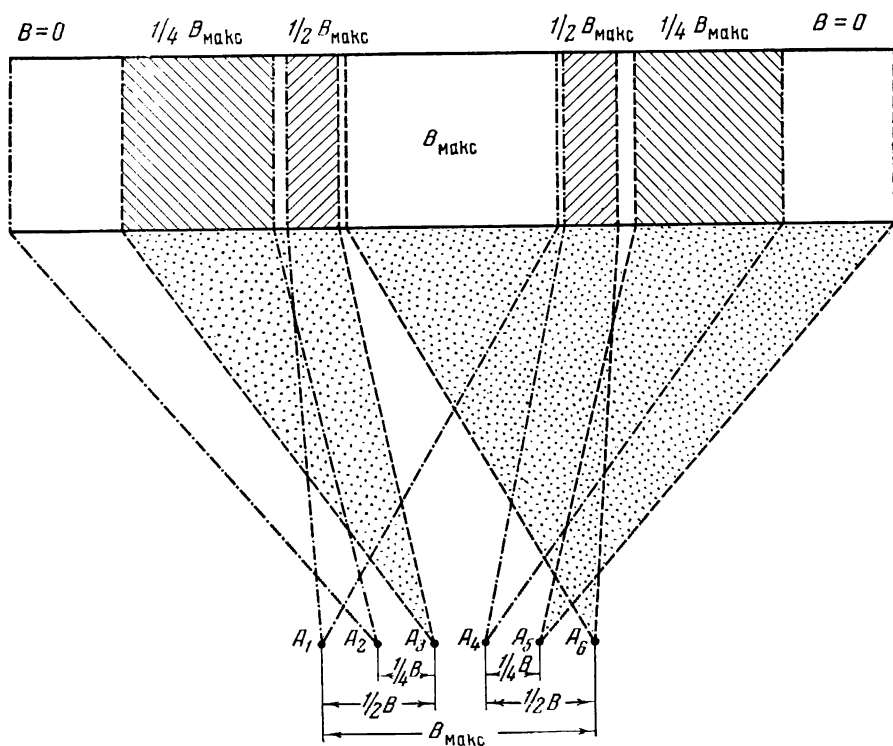


Рис. 144. Схема широкоэкранной стереопроекции с уменьшающейся пластикой к краю экрана

от экрана находится зритель, тем на большую величину выдвигаются к нему с экрана пространственные изображения. Поэтому и для зрителя в панорамном кино, сидящего вблизи одного из краев экрана, стереоскопическая картина будет представляться значительно более выходящей в пространство зрительного зала с удаленных участков экрана, чем с близких. Благодаря этому будет уменьшаться обычно кажущаяся приподнятость панорамного изображения на ближнем от зрителя крае экрана.

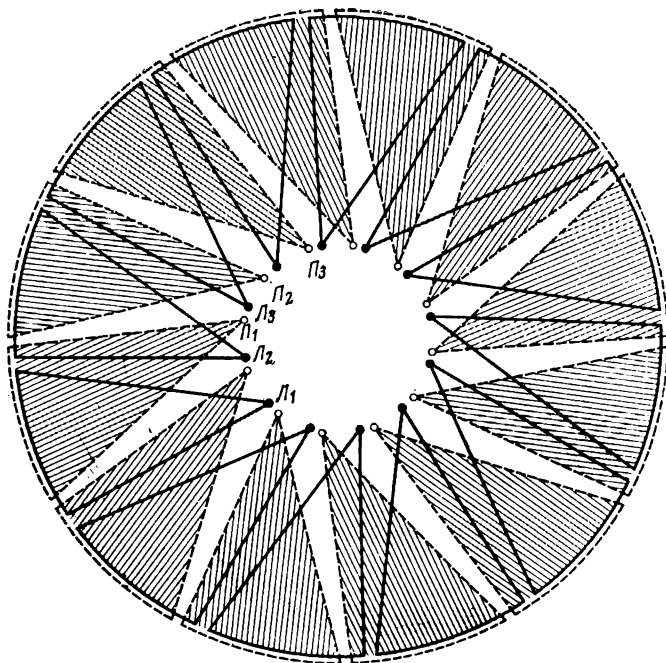


Рис. 145. Схема стереоскопической круговой панорамы (циклорамы)

Значительно бо́льшая естественность пространственного изображения в панорамном кино может быть достигнута, если стереоскопическое изображение, воспроизводимое на экране, будет характеризоваться переменной пластичностью — наибольшей в центре экрана и меньшей по бокам. Такое воспроизведение пространственного изображения было бы равноценно естественному наблюдению, при котором эффективная величина стереобазиса меняется в зависимости от того, смотрим ли мы на предметы прямо или рассматриваем их косым взглядом сбоку. Осуществить такую стереопроекцию в панорамном кино с переменной величиной пластичности можно по схеме, изображенной на рис. 144.

В этом случае фильм должен сниматься с шести точек зрения. На центральную часть экрана проецируются, налагаясь друг на друга, два изображения, предназначенные соответственно для правого и левого глаза зрителя, снятые крайними аппаратами A_1 и A_6 с максимальной величиной базиса $B_{\text{макс}}$. На прилегающие к центральной части зоны экрана проецируются изображения, снятые двумя аппаратами A_3 и A_4 , расположенными посередине между крайними точками съемки. Эти изображения, частично складываясь с соответственными изображениями, снятыми с крайних точек зрения, образуют на экране вокруг центральной зоны две боковые зоны совмещенных стереоизображений, пластичность которых понижена в два раза, благодаря тому что они сняты с уменьшенного

в два раза базиса. Наконец, на крайние участки экрана проецируются изображения, снятые аппаратами A_2 и A_5 , расположенными посередине между каждой крайней точкой и центральными точками съемки. Эти изображения, частично налагаясь на экране на изображения, снятые с центральной точки зрения аппаратами A_3 и A_4 , образуют две зоны стереоскопического изображения с уменьшенной в четыре раза пластикой, так как эти изображения сняты соответственно с базисом, в четыре раза меньшим максимального. На самых крайних участках экрана эти изображения оказываются не совмещенными с соответствующими парами сопряженных изображений, и поэтому здесь образуются зоны монокулярного видения с «нулевой пластичностью» ($B = 0$). Чтобы на всех участках экрана правый глаз зрителя видел изображения, снятые с более правой точки зрения, чем изображение, которое увидит на экране левый глаз, необходимо через одинаково ориентированные фильтры проецировать для левого глаза изображения, снятые аппаратами с точек зрения A_1 , A_2 и A_4 , а для правого глаза — снятые с точек зрения A_3 , A_5 и A_6 . Такой принцип многостереопарной проекции поляризованным светом может быть распространен на сколь угодно широкий экран. На рис. 145 показана возможная схема осуществления стереоциклорамы, т. е. круговой стереоскопической проекции на цилиндрический экран. На схеме указаны условные центры P_1, P_2, \dots , из которых должна производиться съемка изображений, предназначенных для наблюдения правым глазом, и центры L_1, L_2, \dots , из которых должны сниматься изображения, наблюдаемые на экране левым глазом.

Панорамное стереоскопическое кино на широком экране с многоканальным стереоскопическим звуковоспроизведением несомненно является дальнейшим совершенствованием кинематографического воспроизведения картины.

§ 7. СТЕРЕОФОНИЧЕСКОЕ ЗВУКОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ

Стереофония и бинауральный стереоэффект. При проекции стереоскопических фильмов, когда актеры передвигаются в объемном пространстве перед зрителем, возникает потребность для соблюдения реальности картины в стереофоническом воспроизведении звука. Под стереофоническим понимается такое звуковоспроизведение, которое создает для зрителя ощущение, что источник звука перемещается в пространстве вслед за изображением. Например, если на экране изображен говорящий актер, который идет справа налево, то стереофоническое звуковоспроизведение должно обеспечивать у зрителей ощущение, что звук голоса все время исходит от актера, т. е. источник звука также перемещается по экрану справа налево. В данном случае стереофония будет только поперечной, так как она обеспечивает перемещение кажущегося источника звука поперек экрана, без его приближения или удаления от зрителя.

Изменение направления приходящего к зрителю звука может быть достигнуто соответствующим перемещением репродуктора, установленного за экраном, или переключением двух или нескольких репродукторов, установленных по бокам или за экраном с таким расчетом, что, когда звук исходит с правой стороны экрана, работает только правый репродуктор; когда говорящий актер находится посередине экрана, работают оба — и правый и левый репродукторы; когда же актер приближается к левой стороне экрана, громкость правого репродуктора постепенно уменьшается, а громкость левого постепенно увеличивается.

Продольная стереофония должна помогать зрителю оценивать удаленность кажущегося источника звука. Она обеспечивается соответственным нарастанием громкости звука, соответственным опережением или отставанием его от действия, а также изменением затухания звука. Для

передачи звука из-за спины зрителей необходима установка репродукторов в конце зала, противоположном экрану. Идеальная физическая картина стереофонического звуковоспроизведения в кинотеатре была бы такова.

Все пространство зрительного зала имеет равномерно возбужденное звуковое поле, так что зритель не может определить ни направление приходящего звука, ни удаленность центра звукоизлучения (который в данном случае нельзя пайти). Теперь, вводя элементы, расстраивающие или нарушающие равномерно возбужденное состояние звукового поля, можно создать кажущиеся центры звукоизлучения в любой точке пространства зрительного зала.

Благодаря физиологическим особенностям слуха нет необходимости воссоздавать физическую картину пространственного звучания, подобную реальной пространственной картине. Оказывается, что для создания кажущегося направления прихода звука можно воспользоваться способностью человека к биноуральной слуховой ориентации. Биноуральное восприятие не усиливает чувствительность слуха, но облегчает человеку пространственную ориентацию. Одним ухом по громкости звучания человек до некоторой степени способен определить направление источника звучания, поворачивая для этого голову в сторону приходящего звука. Такое ориентировочное определение направления приходящих звуков одним ухом называется *моноуральным стереоэффектом*. С помощью двух ушей человек определяет положение звукового излучателя со значительно большей точностью. Слуховая пространственная ориентация носит название *биноурального стереоэффекта*.

Сущность процесса биноуральной слуховой ориентации на сегодняшний день не вполне ясна. С физической стороны явления можно предположить три гипотезы: во-первых, направление приходящих звуков определяется по разности фаз звуковых волн, поступающих в правое и левое ухо; во-вторых, направление звука может определяться по разности начального момента звучания; в-третьих, направление звука может определяться по разности интенсивности звучания, слышимой правым и левым ухом.

Исследования частично подтвердили положение первой гипотезы. В этих исследованиях было обнаружено, что угол сдвига кажущегося положения источника звука α_0 пропорционален разности времени прихода одинаковых фаз Δt , именно:

$$\alpha_0 \cong 10^5 \Delta t,$$

Другие опыты в известной степени подтвердили выводы и второй гипотезы. Числовые величины, полученные в этих опытах, согласуются друг с другом. Оказалось, что при разнице во времени Δt , которая составляет $3-10^{-5}$ сек., возможно отличать угловой сдвиг направления приходящего звука порядка 3° .

Опыты показали, что направление звука воспринимается не только благодаря различию по времени, но и (по крайней мере для не очень удаленных источников звука) вследствие различия в интенсивностях. При значительном удалении источников звука различие интенсивностей звука, приходящего к правому и левому уху, будет крайне незначительно. По вычислениям Релея звуковая тень от человеческой головы для звука, имеющего частоту 128 колебаний в секунду, составляет только 1%, т. е. при повороте головы одним ухом по направлению к приходящему с большого расстояния звука второе ухо будет получать звук ослабленным по интенсивности всего на 1%.

Наряду с явлениями, подтверждающими изложенные гипотезы биноуральной ориентации, обнаружен ряд фактов и явлений, противоречащих

этим гипотезам, которые вносят некоторую неясность в основные принципы стереофонического звуковоспроизведения.

В то время как при испытании пространственной ориентации при помощи бинаурального стереоэффекта каждое ухо испытуемого изолируется от окружающего пространства, психофизиологическое суммирование двух слуховых ощущений правого и левого уха позволяет со значительной степенью точности определять направление приходящего звука. Если же уши испытуемого не изолированы от окружающего пространства, то при такой постановке эксперимента каждое ухо будет одновременно воспринимать два звуковых возбуждения, предназначенных тому и другому уху. В этом случае создать искусственную пространственную ориентацию крайне трудно и, весьма вероятно, даже недостижимо.

Сtereoфоническое звуковоспроизведение, основанное на бинауральном стереоэффекте, сравнительно легко может быть осуществлено с помощью индивидуальных слуховых инструментов, подводящих к каждому уху слушателя неодинаковые звуковые импульсы, создающие бинауральную пространственную ориентацию. Осуществить стереофоническое звуковоспроизведение без индивидуальных слуховых инструментов в полной мере можно лишь путем воссоздания более или менее физической реальной копии пространственного звукового поля, в противном случае стереофоническое звуковоспроизведение без индивидуальных устройств для слушателей следует ограничить пониженными требованиями в смысле различности направления звукового излучения.

В обыденной жизни человек не замечает или по крайней мере не обращает внимания на кажущиеся погрешности в определении направления приходящего звука в пределах до $10-15^\circ$. Лишь с помощью слуховых приборов, раздвигающих базис между звукоприемниками (слуховыми рупорами или микрофонами до 2 м), можно определять изменение направления приходящего звука с точностью до $1/2^\circ$, но это надо уже отнести (по аналогии с гиперстереоскопией) к явлению гиперстереофонии.

В условиях кинотеатра зритель видит экран из средних рядов зала под углом 15° (по горизонтали); поэтому осуществление стереофонического сопровождения объемной кинопроекции с пониженными требованиями к пространственной ориентации звука — задача, лежащая уже в пределах технической разрешимости.

Что же дает реально зрителю осуществление стереофонического звуковоспроизведения в кинотеатре? Во-первых, усиливает реальность объемного образа при стереоскопической кинопроекции; во-вторых, даже при обычной плоской кинопроекции повышает художественное качество звучания. Это обнаруживается главным образом при воспроизведении музыкальных произведений оркестром, т. е. когда воспроизводится одновременное звучание нескольких источников звука — нескольких музыкальных инструментов. Причины повышения естественности и художественного качества звучания при стереофоническом звуковоспроизведении не вполне выяснены. Очевидно, в данном случае известную роль играет пространственное опережение звуков различных инструментов, что приближает воспроизведение к реальным условиям естественного звучания оркестра.

Сtereoфоническая звукозапись. Принципиально стереофоническая звукозапись является многоканальной записью звука, т. е. такой, при которой прием звука осуществляется в нескольких пространственно разделенных точках приема несколькими микрофонами и весь дальнейший тракт следования звуковых импульсов от каждой точки приема самостоятелен и независим вплоть до записи импульсов на пленку.

При нормальной записи звука обычно одновременно используется несколько микрофонов, от которых идут самостоятельные звуковые тракты

до микшерного устройства, смешивающего звуковые импульсы. Таким образом на пленке записывается в одной фонограмме смесь звуковых импульсов, принятых в различных точках пространства. Из такой фонограммы выделить импульсы, относящиеся к той или другой пространственной точке приема, конечно, уже нельзя.

Чтобы сохранить возможность выделения звуковых импульсов, принятых различными микрофонами, звукозапись на пленке должна осуществляться в виде многоканальных фонограмм, т. е. в виде нескольких звуковых дорожек, на каждой из которых записывается звук, принятый соответствующим пространственно расположенным микрофоном. Наиболее простые системы стереофонической звукозаписи ограничиваются двумя каналами для приема звука и записью звука в виде двухканальной фонограммы. Однако значительно лучшего результата достигают, применяя большее число каналов. При стереофонической звукозаписи необходимо выполнять условия акустической перспективы. Звуковая перспектива создается путем регулирования отношения интенсивностей звуков, приходящих к каждому микрофону. Расположение микрофонов при стереофонической записи зависит от ряда факторов, определяющих стереофоническое качество воспроизведенного звучания. К ним можно отнести отношение фокального расстояния съемочного объектива к углу, образуемому направлениями распространения звука на два микрофона, и положение микрофонов при записи звука. Для придания звуку глубины и перспективы необходимо, чтобы расстояние, на которое передвигается источник звука, соответствовало расстоянию, на которое передвигается объект. Получение направления звука определяется отношением силы звука (идущего к каждому микрофону), а получение эффекта глубины звука определяется соотношением между силой прямого звука, идущего от источника звука к микрофону, и силой отраженного звука. Чем больше реверберация, чем дальше микрофон от источника звука, тем больше кажущееся расстояние от звучащего объекта.

Поэтому для получения лучшей звуковой перспективы микрофоны по возможности должны ближе помещаться к линии, соединяющей центр действия с центром съемочного объектива. Расположение микрофонов в горизонтальной плоскости определяется характером движения звучащего объекта и углом охвата съемочной площади объективом аппарата. Последнее определяется углом зрения объектива, что дает возможность поставить микрофон вне поля его зрения, и в то же время помогает сохранить координацию зрительного образа и звука.

Создание иллюзии поперечного стереоэффекта достигается передвижением микрофонов с учетом всех деталей построения сцены и ее окружающей обстановки. В случае бокового положения источника звука для правильного соотношения интенсивностей прямых звуков, падающих на каждый из двух микрофонов, необходимо, чтобы точки, лежащие на линии, соединяющей микрофоны, были воспроизведены как точки, лежащие на линии, соединяющей репродукторы. В этом случае необходимо, чтобы линия, соединяющая микрофоны, была перпендикулярна к оптической оси съемочного объектива. Положение источника звука сзади края переднего плана сцены характеризуется соотношением интенсивности прямой звуковой волны, идущей от близлежащего источника, и интенсивности отраженных звуков, падающих на микрофон. При проведении стереофонической звукозаписи большое значение имеет расположение микрофонов под правильным углом к сцене, особенно в тех случаях, когда актеры поворачиваются к микрофону то лицом, то спиной. Наиболее подходящим типом микрофонов при стереофонической записи надо считать микрофоны ненаправленного действия.

Раздельная фиксация на пленке нескольких звуковых каналов осуществляется путем записи нескольких самостоятельных фонограмм. При

этом система оптической записи звука может быть любой: как трансверсальной, так и интенсивной. Отдельные фонограммы на пленке могут размещаться в различных вариантах: с обеих сторон кадра у перфорации или рядом у одного края кадра. Такая звукозапись изображена на рис. 146. Ширина фонограмм, соответствующих отдельному звуковому каналу, может быть выбрана разной, но из-за практических соображений экономии пленки для сохранения нормального размера и формата кинокадра целесообразно иметь общую ширину всех фонограмм, равную ширине, принятой для нормальной звуковой дорожки, т. е. 2,2 мм. Для двухканальной фонограммы такая ширина вполне удовлетворительна, однако для современной записи большего числа каналов используется более широкая фонограмма.

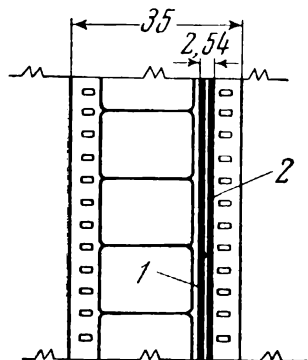


Рис. 146. Схема записи стереофонической фонограммы 1 — фонограмма, записанная с левого микрофона; 2 — фонограмма, записанная с правого микрофона

На рис. 146 приведен один из первых образцов двухканальной стереофонограммы, полученной в 1939 г. по интенсивному методу. Каждая фонограмма имела ширину 1 мм с промежутком в 0,2 мм, т. е. общей шириной в 2,2 мм, как обычная нормальная фонограмма.

При стереоскопической проекции с двух пленок фонограммы могут быть размещены, как обычно, но на обеих пленках. В настоящее время разработаны новые, вполне совершенные методы стереофонической звукозаписи с большим числом каналов на ферромагнитную пленку.

Многоканальное воспроизведение стереозвuka. Стереофоническое звуковоспроизведение основывается на восстановлении в зрительном зале кинотеатра акустической перспективы проецируемой сцены. Сколько самостоятельных каналов использовалось при записи, столько же их должно и сохраняться при воспроизведении стереозвuka. Каждый воспроизводящий канал должен представлять собой изолированный от других тракт, оканчивающийся самостоятельным центром воспроизведения звука, т. е. отдельным репродуктором или отдельной группой репродукторов, пространственно отдаленных от других центров воспроизведения. Пространственное расположение репродукторов при стереофоническом воспроизведении обычно подобно расположению микрофонов при записи стереозвuka. Звуковые импульсы, записанные на каждой отдельной фонограмме, воспринимаются отдельными фотоэлементами, усиливаются самостоятельными усилителями и подаются по отдельным трактам к соответственно расположенным репродукторам.

При двухканальной системе стереофонической записи воспроизведение звука осуществляется также по двум каналам. Для воспроизведения двух стереофонических фонограмм могут применяться две самостоятельные звуковоспроизводящие приставки обычного типа, установленные каждая против соответствующей ей фонограммы. Но в конструктивном отношении для этой цели значительно проще применять одну стандартную оптическую приставку с двухкатодным фотоэлементом. При использовании этого фотоэлемента микрообъектив звуковоспроизводящей приставки рисует изображение штрихов фонограммы на обоих фотокатодах, так что изображение штриха одной фонограммы проектируется на один фотокатод, а изображение штриха другой фонограммы — на другой фотокатод. От каждого фотокатода звуковые сигналы отдают мощность через самостоятельный канал как предварительного, так и основного усиления. Электрическая схема звуковоспроизводящего устройства с двойным фотоэлементом изображена на рис. 147.

Расположение репродукторов при двухканальной системе стереофонического звуковоспроизведения обычно применяется по бокам экрана на одинаковой высоте от пола. Первые образцы отечественной аппаратуры для стереофонической записи звука и звуковоспроизведения были разработаны инженером Б. З. Высоцким и Б. Н. Коноплевым еще в 1940—1941 гг. В том же году в киностудии «Союздетфильм» ими были проведены первые экспериментальные работы по стереофоническому озвучанию фильмов.

Но теперь стереофоническое звуковоспроизведение с многоканальной записью звука получает должное развитие. Не только стереоскопическое, но и широкоэкранное и панорамное кино пользуются сейчас стереофоническим звуковоспроизведением для подчеркивания пространственного

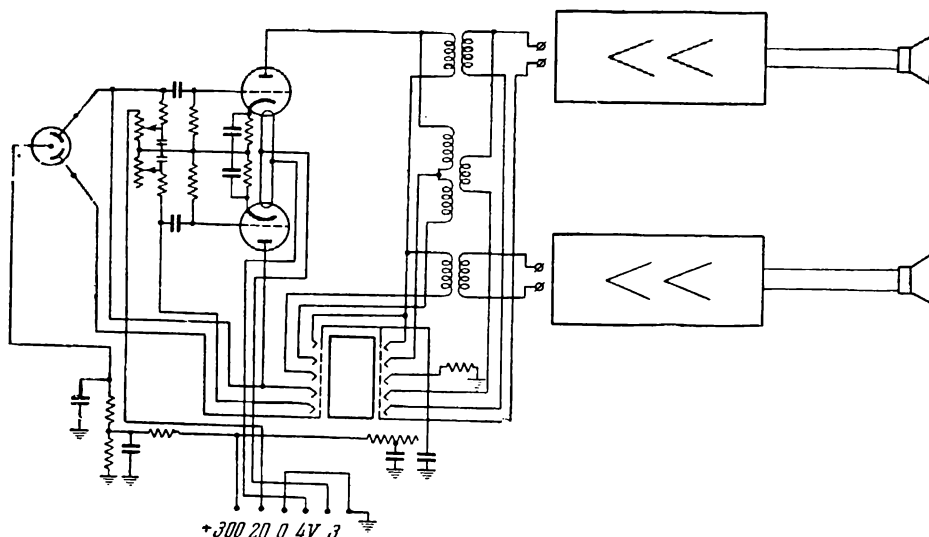


Рис. 147. Схема воспроизведения стереозвука

образа воспроизводимой картины. Наибольшее распространение сейчас получила трехканальная система магнитной стереофонической звукозаписи. Для этой записи звука применяется стереомагнитофон с тремя одинаковыми магнитными головками, записывающими звук в виде трех звуковых дорожек на одной общей пленке. Воспроизведение стереозвука с магнитной пленки осуществляется на том же стереомагнитофоне при помощи трех воспроизводящих головок, каждая из которых работает на отдельный усилитель и громкоговоритель.

Магнитная запись звука иногда делается непосредственно на фильме в виде магнитных дорожек, нанесенных на пленку возле перфорации. Стереофонические фонограммы таких кинофильмов имеют различные формы выполнения.

Псевдостереофоническая звукозапись и псевдостереофоническое звуковоспроизведение. При одноканальном записывающем тракте стереофоническая звукозапись невозможна. Однако в этом случае возможно осуществить искусственную стереофонограмму, процесс получения которой будет называться псевдостереофонической звукозаписью. При такой записи импульсы звука, приходящие к звукозаписывающему аппарату по одному каналу, разделяются на два или несколько каналов непосредственно перед записывающим аппаратом. Каждый канал снабжается своим регулятором громкости, т. е. перед звукозапи-

сывающим аппаратом на тракте имеется своего рода микшерский пульт, только не смешивающий звуковые импульсы, приходящие по разным каналам, а разделяющий их на два или несколько каналов. Для звукозаписи применяется один из описанных выше методов стереофонической звукозаписи. Микшер при записи производит регулировку громкости звуковых импульсов по отдельным каналам в соответствии с желаемым получением направления кажущегося излучения звука и местонахождения звучащего объекта в поле кадра. Таким способом может быть получена псевдостереофоническая фонограмма с уже записанной обычным способом нормальной фонограммы. Для этого нормальная фонограмма должна перезаписываться стереофонической звукозаписывающей аппаратурой с разделением звуковых импульсов на два или несколько каналов и соответствующей регулировкой соотношения их амплитуд.

При воспроизведении псевдостереофонической фонограммы с помощью стереофонической аппаратуры (когда при воспроизведении будет иметься два или несколько самостоятельных звуковоспроизводящих каналов, оканчивающихся пространственно разделенными репродукторами, питаемыми от отдельных звуковых дорожек) будет создаваться некоторая иллюзия акустической перспективы. Такое звуковоспроизведение будет называться псевдостереофоническим.

Попытка получить стереофоническое звуковоспроизведение с помощью обычной фонограммы (т. е. при одноканальной звукозаписи и одноканальном звуковоспроизведении) в некоторых случаях дает известный стереофонический эффект, который может быть отнесен также к разряду псевдостереоэффекта. К одной из таких систем псевдостереофонического звуковоспроизведения можно отнести систему воспроизведения стереозвуча с нормальной фонограммы. При воспроизведении звука используются пространственно расположенные в зрительном зале кинотеатра группы репродукторов, которые автоматически переключаются в соответствии с перемещением звучащих объектов на экране. Автоматическое переключение репродукторов достигается при помощи специальных отметок на киноплёнке, включающих соответствующие реле. Репродукторы при звуковоспроизведении могут переключаться и вручную.

Другая система псевдостереофонического звуковоспроизведения основана на разделении звуковых импульсов, воспринимаемых с нормальной фонограммы, на два или несколько каналов, подводящих эти импульсы после соответствующего усиления к отдельным пространственно разделённым репродукторам. Усиление звуковых импульсов в каждом канале может регулироваться при помощи соответствующих регуляторов громкости. Таким образом, в соответствии с изменением направления звукового излучения можно достигать плавного переключения отдельных репродукторов и создавать некоторую иллюзию акустической перспективы. Конечно, регулирование силы громкости отдельных групп репродукторов может производиться и автоматическим переключением регуляторов громкости.

§ 8. ПРИНЦИПЫ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Широкое развитие телевидения за последние годы сделало его настолько массовым, что теперь в крупных городах редкая семья не имеет своего телевизора. Достаточно сказать, что, например, в Москве к началу 1959 г. насчитывалось более 700 тыс. телевизоров. Такое широкое развитие телевидения выдвигает актуальные требования к совершенствованию качества телевизионного изображения. Сейчас очередные задачи телевизионной техники — это придание цвета и объёмности воспроизводимому изображению. При стереоскопическом воспроизведении телевизионное изображение много выигрывает. Эффект здесь ощущается даже больший,

чем в кинотеатре. Последнее объясняется, очевидно, тем, что телевизионное изображение рассматривается зрителем с более близкого расстояния, чем изображение в кинотеатре, а, как известно, объемность, телесность предметов, рассматриваемых с близких расстояний, всегда ощущается сильнее. Чтобы придать большую естественность телевизионному изображению, наряду со стереоскопическим воспроизведением телевизионной картины, очевидно, найдет применение широкоэкранное и панорамное воспроизведение картины.

Опыт проводившихся стереоскопических телевизионных передач показывает, что особенно эффектно проявляется объемность при воспроизведении движущихся объектов, причем резко всего ощущается объем при движении объектов передаваемых сцен в направлении к зрителю. Большое впечатление на зрителя производит стереоэффект во время быстрых изменений базиса передачи. При увеличении базиса зрителю кажется, что передаваемая сцена приближается к нему, и, наоборот, при уменьшении базиса сцена кажется удаляющейся от него. Очень выигрывает естественность перспективы телевизионного изображения при стереоскопическом воспроизведении. Но не только этими преимуществами отличается телевизионная стереопередача.

Проф. П. В. Шмаков, занимавшийся исследованием систем воспроизведения телевизионного изображения, отмечает значительное уменьшение помех, вызываемых различными флуктуациями в электрическом канале, при стереоскопическом наблюдении телевизионного изображения. В то время как эти помехи при обычном воспроизведении телевизионного изображения неразрывно связаны с деталями изображения и воспринимаются лежащими в одной плоскости с ним, помехи объемного изображения воспринимаются отдельно от его деталей. Когда зритель рассматривает какую-то деталь передаваемой сцены, то флуктуационные помехи мало заметны; они оказываются не связанными с поверхностью рассматриваемого объекта, а представляются расположенными в пространстве независимо от деталей изображения. Зритель может фиксировать свое внимание на указанных помехах; присматриваясь к ним, он видит их более заметными, но опять-таки не совмещенными с поверхностью воспроизводимого объекта. Объемное распределение помех и их меньшее восприятие объясняется наличием непрерывно меняющегося параллакса между точками помех на изображениях, рассматривающихся правым и левым глазом.

Следствием кажущегося повышения отношения сигнала к помехе при стереоскопическом воспроизведении является повышение разрешающей способности телевизионной системы. На ряде реальных объектов было отмечено, что кажущаяся четкость изображения увеличивается в значительных пределах. Но эти соотношения оказываются действительными только при средних значениях отношения сигнала к помехе, принятого для обычных телевизионных изображений. При отношениях достаточно малых, когда наблюдение обычного плоскостного изображения невозможно, объемное изображение также не воспроизводится. В этом случае если качество левого и правого изображений при стереоскопическом воспроизведении не одинаково, то объемное изображение по качеству приближается к лучшему из них.

Это далеко не полное перечисление преимуществ стереоскопического воспроизведения телевизионных изображений подчеркивает явную целесообразность использования стереоэффекта в телевидении. Вместе с тем надо отметить, что объемное телевидение целесообразно сочетать с цветным, так как, помимо зрительного обогащения воспроизводимой картины, оно в некоторых случаях может облегчить и техническое решение проблемы цветного телевидения.

Принципиальная задача осуществления стереоскопического воспроизведения телевизионного изображения решается во многом аналогично

решению задачи стереоскопического воспроизведения кинокартины. В данном случае процесс также разбивается на две стадии: съемку-передачу и проекцию — воспроизведение стереоскопического изображения.

Наиболее просто весь этот процесс можно представить следующим образом. Для телевизионной съемки и передачи левого и правого изображений стереопары используются две обычные передающие телевизионные камеры, работающие одновременно, объективы которых фиксируют передаваемую сцену: один — как бы с точки зрения левого глаза, другой — с точки зрения правого глаза.

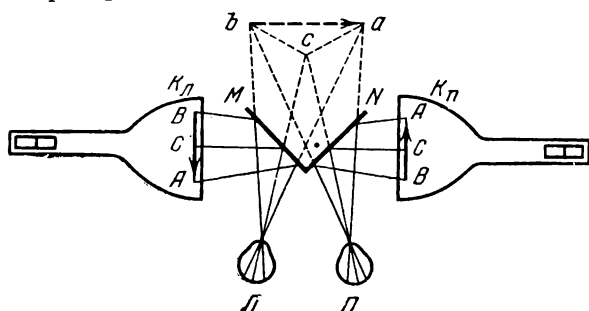


Рис. 148. Схема наблюдения стереоскопического телевизионного изображения через зеркальный стереоскоп с двух кинескопов $K_{\text{л}}$ и $K_{\text{п}}$

Естественно, что передача этих изображений может вестись одновременно по двум каналам радиосвязи и может быть принята двумя телевизионными приемниками, соответственно настроенными на первый и второй каналы связи. Изображение, предназначенное левому глазу зрителя, будет получено на экране одной телевизион-

ной трубки, изображение, предназначенное правому глазу, — на экране другой трубки. Стереоскопическое рассматривание двух таким образом полученных изображений может вестись, например, при помощи зеркального стереоскопа, как это схематично изображено на рис. 148.

Левый (Л) и правый (П) глаз зрителя, наблюдая, соответственно через зеркала M и N изображения ABC на экране левого кинескопа $K_{\text{л}}$ и экране правого кинескопа $K_{\text{п}}$, увидят пространственное изображение объекта за зеркалами, показанное на схеме пунктирными лучами abc . Вполне очевидно, что стереоскопическая проекция сопряженных изображений с экрана правого и левого кинескопов может быть осуществлена методом анаглифической или растровой сепарации лучей с возможностью одновременного наблюдения стереоскопической картины на экране многими зрителями. Один из вариантов такой проекции на растровый двусторонний просвечивающий экран представлен схематично на рис. 149.

Изображения с экранов левого $K_{\text{л}}$ и правого $K_{\text{п}}$, кинескопов совмещаются на общем экране S путем их проекции соответственно двумя объективами $O_{\text{л}}$ и $O_{\text{п}}$ через щелевой растр P_1 . На экране каждое изображение разбивается на вертикальные полосы $Л, Л_1, \dots$ и $П, П_1, \dots$, которые последовательно чередуются, не налагаясь друг на друга. Рассматривание совмещенных изображений производится с обратной стороны экрана через второй щелевой растр P_2 . При этом левый глаз (Л) зрителя увидит изображение, составленное только из полосок $Л, Л_1, \dots$, а правый глаз (П) — изображение, составленное только из полосок $П, П_1, \dots$, т. е. левый глаз зрителя будет видеть изображение, принятое на левом кинескопе, а правый глаз — изображение, принятое на правом кинескопе. Такую возможность избирательного наблюдения стереоскопической пары изображений, очевидно, будут иметь и другие зрители, если они соответственно расположатся в других зонах избирательного видения этого растрового экрана.

Из рассмотренной нами схемы можно видеть, что простейший путь сделать телевизионное изображение объемным состоит в том, чтобы для передачи и воспроизведения телевизионного изображения воспользоваться двойным количеством аппаратуры, применить две передающие

телевизионные камеры, для приема воспользоваться двумя телевизорами, а для передачи сигналов занять два радиоканала связи. Такое решение в известной мере можно рассматривать аналогичным применению двух съемочных камер при съемке и двух проекторов при проекции стереоскопического кинофильма, размещаемого при этом на двух пленках (одной с левыми, другой с правыми кадрами). Конечно, признать такое решение технически совершенным нельзя. Поэтому для практической реализации стереоскопического воспроизведения телевизионных изображений предложен ряд конструктивных схем, стремящихся в той или иной степени усовершенствовать описанную нами схему как в передающей, так и в приемной части.

Рассмотрим вначале конструктивные варианты практически реализуемых передающих устройств. Прежде всего заметим, что две обычные телевизионные камеры, необходимые для передачи объемного изображения, конструктивно могут быть объединены в одну простую компактную камеру с двумя передающими трубками и двумя объективами. Такая стереотелевизионная камера, конечно, окажется более легкой и более удобной в работе. На рис. 150 приведена блок-схема подобной камеры. Изображение передаваемого объекта A рисуется двумя объективами O_L и O_P на фотокатодах двух передающих трубок K_L и K_P . В качестве передающих трубок, обеспечивающих наибольшую идентичность развертки обоих изображений, может служить высокочувствительная трубка с переносом изображения. Получаемые сигналы левого (L) и правого (P) изображений направляются от камеры по коаксиальному кабелю в соответствующие видеоканалы, а оттуда на радиопередатчик. Чтобы можно было менять величину базиса передачи, перед объективами камеры могут устанавливаться зеркальные или призменные стереонасадки, подобные тем, какие применяются для изменения базиса при стереоскопической киносъемке камерами с двумя объективами.

Передачу двух изображений стереопары можно вести и телевизионной камерой, имеющей всего одну передающую трубку. В этом случае левые и правые изображения стереопары могут передаваться одновременно, если они будут размещаться рядом друг с другом на площади одного кадра, или же поочередно одной трубкой. Последовательность передачи изображений определяется задаваемым характером движения развертывающего луча. В зависимости от применяемой системы развертки изображения могут передаваться одновременно или последовательно. В том случае, если развертывающий луч будет производить развертку всего поля изображения, проектирующегося на фотокатод, будет происходить одновременная развертка левых и правых изображений кадра с последовательным

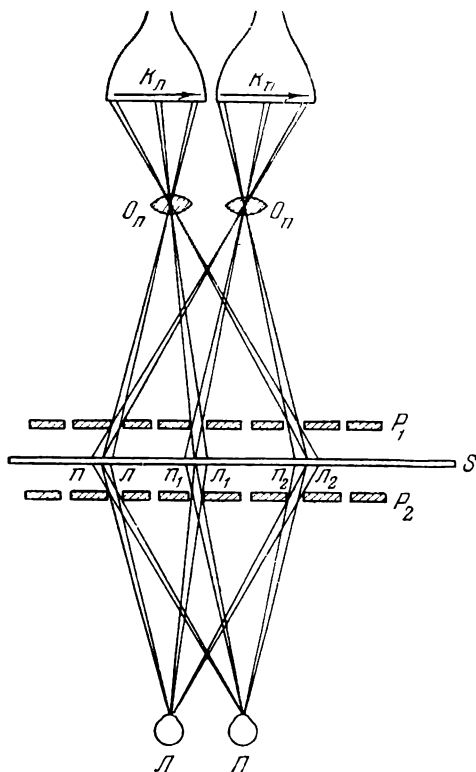


Рис. 149. Принципиальная схема стереопроекции телевизионной картины на растровый экран, работающий на просвет

чередованием строк. Если же луч будет поочередно развертывать то левую, то правую половину поля изображений, будет происходить вначале развертка строк только одного левого изображения, а затем строк только правого изображения; следовательно, левые и правые изображения будут передаваться, чередуясь в последовательном порядке. В подобной телевизионной камере для получения двух изображений стереопары может применяться вместо двух только один объектив с соответствующей зеркальной или призмной стереонасадкой, какие употребляются для получения стереоскопического фотографирования однообъективными камерами.

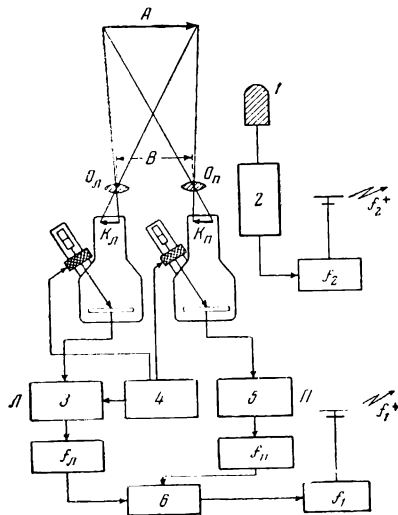


Рис. 150. Схема передатчика одновременной системы стереоскопического телевидения:

1 — микрофон; 2 — звуковой канал; 3 — видеосигнал Л; 4 — управление; 5 — видеосигнал П; 6 — смеситель

Система последовательной передачи левых и правых изображений может быть обеспечена и несколько другим путем. Для этого на светочувствительный слой передающей трубки должны проектироваться в последовательном порядке, чередуясь, левые и правые изображения стереопары. Такая система наиболее просто осуществляется при телевизионной передаче стереоскопических кинофильмов с чередующимися кадрами левых и правых изображений.

Рассмотрим теперь наметившиеся пути конструирования стереотелевизионных приемников. Обращаясь к описанной нами принципиальной схеме приема стереоскопических телевизионных передач на два самостоятельных телевизора, можно заметить, что естественным конструктивным усовершенствованием такого приема было бы применение вместо двух телевизоров одного с установленными в нем двумя

кинескопами. Действительно, ряд схем такого рода стереотелевизоров уже предлагался. На рис. 151 представлена укрупненная блок-схема одного из телевизионных приемников с двумя приемными трубками. В отличие от обычного телевизора в такого рода стереотелевизионном приемнике, помимо двух кинескопов, работающих от двух самостоятельных видеоканалов, должно быть предусмотрено наличие оптического устройства, совмещающего на экране изображения левого и правого кадров в одно общее изображение, и применение устройства, обеспечивающего селекцию изображений для левого и правого глаза зрителей.

Изображение левого кадра (K_L) с экрана левого кинескопа проектируется объективом O_L через зеркальную приставку и оптический фильтр Q_L на просвечивающий экран ЭЭ. Точно так же изображение правого кадра (K_P) с экрана другого кинескопа проектируется вторым объективом O_P через зеркальную приставку S и второй оптический фильтр Q_P на тот же экран. На экране оба изображения левого и правого кадров оказываются совмещенными в одно изображение A' , которое может рассматриваться зрителем A с противоположной стороны просвечивающего экрана ЭЭ. Чтобы зритель левым глазом видел предназначенное ему левое изображение стереопары, а правым глазом — правое изображение, используется оптическое разделение изображений с помощью светофильтров Q_L и Q_P и очков ЛП, помещаемых перед глазами зрителей и осуществляющих анаглифическую сепарацию стереоскопических изображений. Фильтры Q_L и Q_P либо создают окраску лучей, проектирующих на экран левое и пра-

вое изображения в два дополнительных цвета, либо поляризуют эти лучи во взаимно-перпендикулярных направлениях. В соответствии с этим очки ЛП представляют собой либо цветные светофильтры со стеклами дополнительных цветов, либо поляризационные светофильтры со взаимно-перпендикулярно ориентированными осями плоскости поляризации. Таким образом через один светофильтр (Л) проходят только лучи, пропущенные на экран фильтром Q_L , от левого кинескопа, а через второй светофильтр (П) — только лучи, пропущенные фильтром Q_P , от правого кинескопа.

При двухканальной системе стереоскопической телевизионной передачи в приемном устройстве вместо двух трубок может применяться одна двухлучевая трубка. В этом случае оба луча трубки работают одновременно: один разворачивает изображение левого кадра на одной половине экрана,

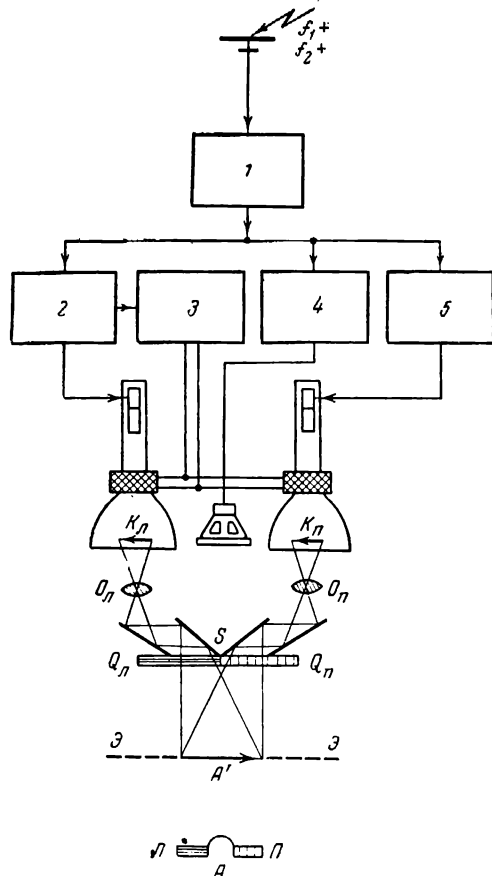


Рис. 151. Схема приемника одновременной системы объемного телевидения:

1 — радиоприемник; 2 — видеоканал Л; 3 — управление; 4 — звуковой канал; 5 — видеоканал П

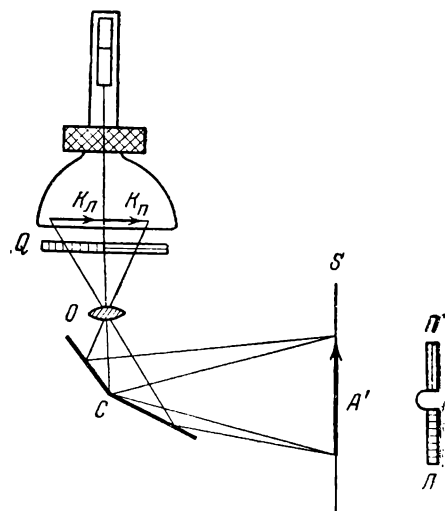


Рис. 152. Схема приемника последовательной системы объемного телевидения с одной трубкой

а другой изображение правого кадра на другой половине экрана. В одноканальной системе передачи оба изображения (левое и правое) одного и того же кадра принимаются на общий экран одной приемной трубки. При этом левое изображение кадра может располагаться на левой половине экрана кинескопа, а правое изображение — на правой половине, т. е. точно так же, как располагаются изображения стереопары на экране двухлучевой трубки при двухканальной передаче.

Схема оптического устройства стереотелевизионного приемника с одной трубкой приведена на рис. 152. Здесь для проекционного совмещения на общем экране обоих изображений стереопары K_L и K_P применяется один объектив O с оптическим устройством в виде двухзеркальной насадки C . Левое (K_L) и правое (K_P) изображения стереопары с общего кинескопа проецируются объективом O на экран S через

зеркальную насадку C , которая обуславливает совмещение обоих изображений на экране в одно общее изображение A' . Световой поток от каждого изображения стереопары проходит через свой поляризатор Q , поэтому изображение A' будет воспроизводиться поляризованным светом. Зритель, пользуясь очками $ЛП$ из поляризаторов, ориентированных аналогично Q , будет воспринимать строки изображения $K_Л$ последовательно за строками изображения $K_П$, причем строки $K_Л$ — левым глазом, а строки $K_П$ — правым глазом. Благодаря такому раздельному зрительному восприятию левого и правого изображений стереопары совмещенное изображение A' представится объемным. В данной схеме вместо поляризаторов для анаглифического воспроизведения можно применить цветные фильтры дополнительных цветов. Возможно также осуществить и безочковую стереопроекцию этого телевизионного изображения на линзово-растровый стереозэкран, воспользовавшись той же самой оптической системой.

Особенно простую конструкцию получает телевизионный приемник с одной трубкой, если для получения объемного изображения применяется последовательно чередующаяся передача левых и правых изображений стереопары. Поскольку левые ($K_Л$) и правые ($K_П$) кадры передаются в этой системе последовательно, то их можно воспроизводить на одном и том же кадре экрана. Таким образом, можно освободиться от необходимости оптического совмещения изображений левого и правого кадров на экране, заменив его электрическим совмещением изображений на экране трубки. Для осуществления раздельного восприятия левым и правым глазом соответственно левых и правых изображений передаваемой стереопары перед экраном трубки укрепляется вращающийся диск с красными и зелеными светофильтрами. Вращение диска должно происходить синхронно с переключением передающих трубок. Зритель, наблюдая через светофильтры диска левым глазом левые изображения стереопары, а правым глазом правые изображения, будет видеть объемную картину. Такие же результаты можно получить, если заменить на диске цветные светофильтры поляризаторами, плоскости поляризации которых в чередующемся порядке ориентированы взаимно-перпендикулярно.

Для возможности непосредственного наблюдения стереоскопического изображения на экране приемной телевизионной трубки без пользования какими-либо очками предложены конструкции специальных телевизионных трубок с растровыми экранами. При применении таких трубок совмещенные правое и левое изображения стереопары воспроизводятся на светящемся люминофорном экране трубки в виде параллаксограммы, составленной из чередующихся полосок левого и правого изображений. Получение параллаксограммы на экране трубки может достигаться как путем разбивки изображения на параллаксограмму в передающем устройстве, так и путем разбивки принимаемых изображений на параллаксограмму специальными устройствами, применяемыми в приемных трубках. Наиболее просто параллаксограмма в виде параллельных полосок левого и правого изображений может быть получена при вертикальном направлении развертки строк и чередующейся последовательности в передаче строк левого и правого изображений.

Для одновременного приема двух кадров в виде параллаксограммы при вертикальной развертке может быть использована двухлучевая трубка. В этом случае видеосигналы каждого кадра подводятся к управляющим электродам электронных прожекторов соответствующих лучей. Последние одновременно воспроизводят смешанную параллаксограмму из чередующихся полосок левого и правого кадров. Использование двухлучевой приемной трубки позволяет и в двухканальной системе с вертикальной разверткой связать параллаксограмму с решеткой, образу-

емой электронным лучом на экране из ионных кристаллов. В случае передачи параллаксаграммы в виде перспективно сходящихся полосок перед экраном приемной трубки может устанавливаться перспективный линзовый растр, как это схематично показано на рис. 153.

Как видно из рисунка, веер электронных лучей, расходящихся из точки M , образует на экране S трапецию, представляющую усеченный треугольник с вершиной C . Трапециoidalность кадра зависит от угла, составленного осью электронного прожектора и нормалью к экрану трубки, т. е. от положения точки M на окружности, описанной из C радиусом DM . Это в свою очередь определяет наклон линий растра, а следовательно, и положение точки их сходимости. Зная угол φ , положение точки C

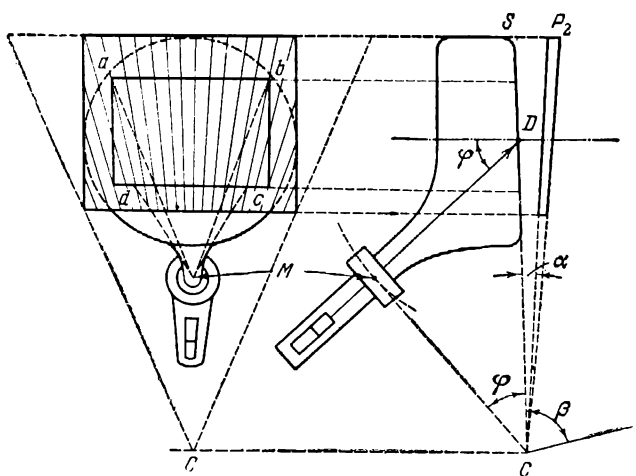


Рис. 153. Схема использования растрового экрана при приеме объемного телевидения

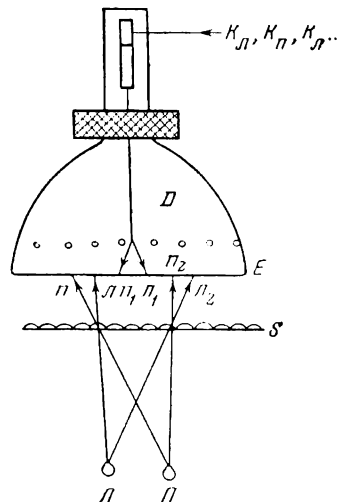


Рис. 154. Воспроизведение объемных изображений с электрическим образованием параллаксаграммы

и длину электронного луча $MD = r$, т. е. расстояние от середины отклоняющей системы до экрана S , по оси электронного прожектора можем определить α — угол наклона линзового перспективного растра P_2 и соответствующий ему β — угол наклона плоскости избирательного видения.

Телевизионная передача стереоскопического изображения в виде готовой параллаксаграммы требует поддержания очень стабильного положения элементов параллаксаграммы на экране приемной трубки. В противном случае небольшие смещения ее по горизонтали могут приводить к потере стереозффекта из-за смещения зон избирательного видения. Предотвратить горизонтальные смещения параллаксаграммы по экрану можно только при очень высокой стабильности работы приемного устройства, что практически сделать очень трудно. Для получения стабильного положения полосок параллаксаграммы на экране приемной трубки сделаны предложения получать параллаксаграмму с помощью стационарных решеток, укрепляемых в самой приемной трубке. Один из вариантов такого решения — применение трубки с электрическим смещением луча, схематически изображенной на рис. 154.

В соединении с линзовым растром S такая трубка представляет оптическую систему, обеспечивающую безочковое воспроизведение стереоскопических изображений. При развертке элементов изображения электронный луч проходит между штырьками решетки D , к которым прикладывается переменное смещающее напряжение U_c . В то время, когда передается,

например, левое изображение стереопары, приложенное напряжением к решетке D отклоняет движущийся вдоль строки электронный луч на полосы экрана L, L_1, \dots , образующие левые элементы параллаксаграммы, а когда передается правое изображение, приложенное к решетке D , напряжение отклоняет движущийся электронный луч на полосы P, P_1, \dots , образующие правые элементы параллаксаграммы. Образование параллаксаграммы на экране такой трубки возможно как при покадровой, так и при построчечной и при поэлементной развертке левого и правого изображений стереопары. Только период изменений смещающего напряжения соответственно должен равняться времени передачи кадра, строки или элемента развертки. Для образования параллаксаграммы в самой приемной трубке предложен ряд других конструкций.

Следует отметить, что системы растрового воспроизведения стереоскопических телевизионных изображений оказались практически трудно осуществимыми, так как необходима большая точность оптического совмещения элементов параллаксаграммы, образующихся движущимся электронным лучом, с неподвижными элементами линзового раstra.

Серьезным затруднением, препятствующим быстрому развитию стереоскопического телевидения, является сложность использования для передачи двух видеоканалов. При передаче стереоскопической пары изображений обычными телевизионными методами с сохранением стандартного числа строк и стандартной частоты кадров оба видеоканала занимают удвоенную полосу радиочастот. Сужение полосы частот, необходимой для передачи объемного телевидения, до стандартной полосы частот, занимаемой обычной телевизионной передачей, — одна из актуальных задач практической реализации стереоскопического телевидения. Задача сужения полосы частот стереотелевизионной передачи, естественно, должна решаться при условии сохранения заданной четкости изображения, определяемой числом строк разложения.

Решить этот вопрос можно в принципе несколькими путями. Рассмотрим пути, лишь специфичные для передачи стереоскопических телевизионных изображений. Пути эти — применение специальных методов развертки телевизионного изображения. Для иллюстрации таких возможностей остановимся на примерах этого рода разверток, предложенных проф. П. В. Шмаковым. Сужение полосы частот вдвое может быть достигнуто, например, путем введения прерывисто-строчной развертки кадров. В каждом канале передатчика и приемника размещаются коммутаторы, работающие синхронно и управляемые строчными импульсами. С помощью этих коммутаторов за время развертки первого поля кадра из левого или правого изображений выбираются только, например, нечетные элементы, а за время развертки второго поля — четные элементы. Этот процесс может происходить в обоих каналах или одновременно, или последовательно. В первом случае система требует двух каналов связи с понижением полосы частот в каждом из них вдвое. Во втором случае система может работать на одном канале, поскольку левый и правый каналы могут быть объединены в общий канал с временным разделением сигналов.

Для стереоскопического телевидения представляет интерес применение ступенчатой развертки стереопары, допускающей как последовательную, так и одновременную передачу сигналов левого и правого изображений по одной линии связи без расширения полосы частот против обычной. На рис. 155 приведена схема развертки подобной системы для последовательной передачи и приема элементов левого и правого изображений стереопары на два сдвинутых на экране кадра. Сепарация изображений стереопары в приемном устройстве анаглифическая, производится

с помощью светофильтров. Если ступенчатая развертка осуществлена так, что из одноименных строк стереопары выбираются нечетные элементы одного кадра и четные — другого, то скорость развертки по строке будет стандартной. Поэтому синусоидальное напряжение, образующее ступенчатую развертку благодаря качанию луча между уровнями I и II , должно иметь частоту, равную максимальной стандартной частоте передачи: $f_{\text{кач}} = f_{\text{макс}}$. Так как на каждом кадре образуется точечный растр правого и левого изображений стереопары, то, очевидно, для немерцающего воспроизведения можно ограничиться стандартной частотой смены полей кадров. Аналогичные результаты могут быть получены, если заменить трубку со ступенчатой разверткой двумя трубками с обычной разверткой, оставив ту же коммутацию каналов.

Частота коммутации и равная ей частота качания луча в ступенчатой развертке играют роль поднесущих частот, которые могут подвергаться соответствующим преобразованиям в высокочастотных каналах. На пути практической реализации стереоскопического телевидения важен вопрос об использовании для приема существующих телевизоров. В известной мере при стереопередаче приемники черно-белого телевидения смогут выполнять прежние функции. Так, например, при двухканальной системе передачи на обычный телевизор можно будет принимать изображение одного из каналов. В случае же сужения полосы в каждом канале или объединения их в один необходимо будет добавить в обычный телевизионный приемник соответствующий блок, с помощью которого можно было бы осуществить регенерацию, прерывание строк и т. д. Существующие телевизионные приемники могут быть приспособлены и к приему объемного телевидения при эксплуатации систем, использующих для приема изображений стереопары одну трубку.

Возможности использования обычных телевизоров для приема объемного и в то же время цветного изображения мы коснемся несколько дальше. Что же касается создания особых трюковых эффектов при художественном воспроизведении телевизионных изображений, то стереоскопическая передача открывает здесь большие возможности. Несомненно, при развитии объемного телевизионного вещания от режиссера потребуются преднамеренное искажение перспективы для подчеркивания того или иного плана в пространстве, чтобы фиксировать внимание зрителей на этой части передаваемых образов.

§ 9. СИСТЕМЫ ЦВЕТНОГО СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Проблемы цветного и объемного телевидения являются, конечно, независимыми друг от друга. Однако каждый из этих видов техники расширяет возможности существующего черно-белого телевидения. Обобщение системы цветного и объемного телевидения открывает возможности максимального приближения искусства и техники воспроизведения изображений к богатству естественной картины. Создание системы цветного стереоскопического телевидения преследует цель гармонического сочетания в воспроизводимом изображении натуральной окраски, объемности предметов и глубины пространства. Эту цель можно достичь путем механического соединения какой-либо системы цветного телевидения с системой объемного телевидения и путем построения специфической системы стерео-

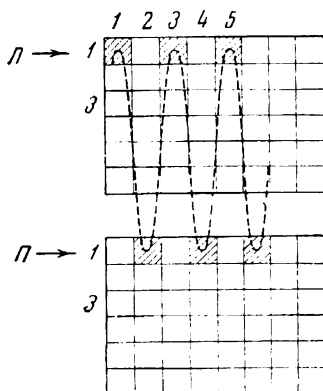


Рис. 155. Схема ступенчатой развертки стереопары

цветного телевидения. Второй путь основывается на эффекте бинокулярного смещения цветов, заключающегося в том, что при раздражении сетчатки каждого глаза в отдельности разными цветами возникает ощущение нового, третьего цвета. Этот метод воспроизведения цветных стереоскопических изображений хотя и не может дать идеальное решение проблемы, но заслуживает внимания, поскольку он позволяет обеспечить достаточно качественное воспроизведение цветных стереоскопических изображений наиболее простыми техническими средствами и осуществим на базе существующих телевизоров.

Действительно, для осуществления стереоскопического воспроизведения телевизионного изображения требуется передавать и принимать вместо одного два изображения, составляющих стереопару. Для этого, как мы знаем, в черно-белом телевидении в принципе достаточно взять удвоенное количество передающей и приемной аппаратуры, чтобы совместно передавать два изображения одного и того же объекта по двум каналам, к двум одновременно действующим телевизорам. Точно так же решается эта задача и для стереоскопического воспроизведения цветных изображений. Если по двум каналам цветного телевидения передавать одновременно два цветных изображения, составляющих стереопару, и принимать эти изображения на два цветных телевизора, то, пользуясь описанными ранее оптическими устройствами, с помощью которых можно одновременно наблюдать совмещенную картину изображений с экрана одного телевизора только левым глазом, а с экрана другого телевизора только правым глазом, мы, как и в системе черно-белого телевидения, получим пространственную картину, по уже воспроизведенную в натуральных цветах. Для оптического совмещения обоих цветных изображений и их раздельного наблюдения левым и правым глазом в принципе применима любая система оптической сепарации, рассмотренная нами применительно к стереоскопическому воспроизведению обычных черно-белых изображений. Исключение составляет только анаглифическая система, поскольку она требует вести наблюдение картины через цветные очки, что приводит к нарушению естественности в передаче цветов воспроизводимого изображения.

Что же касается технических возможностей объединения двух каналов связи в один, конструктивного объединения двух телевизоров и двух передающих устройств в одно устройство, то эти возможности для стереоскопической системы цветного телевидения имеют те же принципиальные решения, что и при осуществлении стереоскопического воспроизведения черно-белого изображения. Конечно, при осуществлении цветного стереоскопического телевидения возможно использовать как двухцветные, так и трехцветные и многоцветные системы воспроизведения телевизионных изображений. Наиболее просто осуществимой является двухцветная система объемного телевидения. Хотя эта система и позволяет воспроизводить почти все спектральные оттенки, все же она не дает полного богатства красок естественной картины, так как многие цвета в такой системе получаются очень бледными, мало насыщенными. В настоящее время в цветном телевидении, так же как и в кинематографии, удовлетворительным решением для воспроизведения цветной картины считается трехцветная система. Применение большего числа основных цветов для синтеза цветной картины практически дает уже малоощутимое улучшение цветопередачи.

В современной телевизионной технике наиболее прогрессивны те методы воспроизведения цветных изображений, при осуществлении которых удастся сохранить существующие стандарты основных параметров телевизионной передачи. В этом случае возможен прием обычных передач на цветной телевизор и цветных передач в виде черно-белого изображения на обычный телевизор. Для соблюдения такой возможности необходимым

условием является сохранение в цветной передаче того же количества строк развертки, той же частоты смены кадров и той же полосы спектра частот, что и в передачах черно-белого телевидения. Можно полагать, что такое же решение возможно и для осуществления цветного стереоскопического воспроизведения телевизионных изображений.

Рассмотрим, какие здесь существуют в принципе пути практического решения задачи. Для воспроизведения цветных телевизионных изображений со стандартной шириной полосы частот и стандартными параметрами развертки черно-белого телевидения хорошим техническим решением является система цветного телевидения, основанная на передаче разностных цветовых компонент. Основное отличие этой системы состоит в том, что в ней вместе с сигналами черно-белого изображения отдельно передаются сопровождающие это изображение сигналы цвета, занимающие сравнительно небольшую полосу частот и замешиваемые в основной спектр сигналов черно-белого изображения. При этом в качестве сигналов цвета используются не сами цветные сигналы, а разности, получаемые вычитанием двух цветовых сигналов из яркостного сигнала черно-белого изображения.

Как известно, белый цвет может быть получен суммированием световых потоков трех основных цветов, например красного, зеленого и синего. Поэтому в трехцветной системе телевидения электрический сигнал, определяющий яркость любого цвета (U_B), должен представлять собой сумму трех сигналов основных цветов, т. е. он может быть представлен уравнением

$$U_B = \alpha U_K + \beta U_Z + \gamma U_C,$$

где U_K , U_Z и U_C — соответственно интенсивности сигнала, определяющего красную, зеленую и синюю компоненты цвета. Количественные значения коэффициентов α , β и γ определяются выбором спектральных характеристик основных цветов с таким расчетом, чтобы установить необходимую пропорцию между интенсивностями красного, зеленого и синего цветов для получения из их суммы белого цвета.

Совершенно ясно, что для полного определения яркости и цвета воспроизводимой детали изображения на месте приема необходимо располагать информацией их трех сигналов цветовых компонент. Но, очевидно, определить эти сигналы возможно и по трем независимым комбинациям этих сигналов. В рассматриваемой нами системе цветного телевидения за три независимые сигнала принимаются яркостный сигнал U_B , представляющий сумму сигналов трех цветовых компонент, и два разностных сигнала между яркостным сигналом и соответственно сигналами красной и зеленой цветной компоненты.

На рис. 156 представлена укрупненная блок-схема передающего устройства цветного телевидения, в которой используется этот принцип действия. На выходе передающей телевизионной камеры в данном случае необходимо иметь три сигнала основных цветных компонент: красного (К), зеленого (З) и синего (С). Эти сигналы направляются в общий смеситель, где они суммируются в общий яркостный сигнал. С выхода смесителя полный яркостный сигнал, могущий служить для черно-белого воспроизведения передаваемого изображения, направляется к передатчику. Кроме того, сигналы двух цветов — красный (К) и зеленый (З) — от камеры направляются через два отдельных низкочастотных фильтра К и З с полосой пропускания от 0 до 1 МГц в два других смесителя. Каждый из цветных сигналов смешивается в своем смесителе с полным сигналом Б, в результате чего на выходе смесителей образуются разностные сигналы (К — Б) и (З — Б). Эти сигналы поступают, соответственно, в два самостоятельных модулятора, питаемых генератором поднесущей частоты, например 5 МГц.

Эта частота выбирается с таким расчетом, чтобы модулированные колебания цветowych компонент, вводимые потом в спектр видеосигнала, легли в промежутки между сигналами черно-белого изображения. Частота

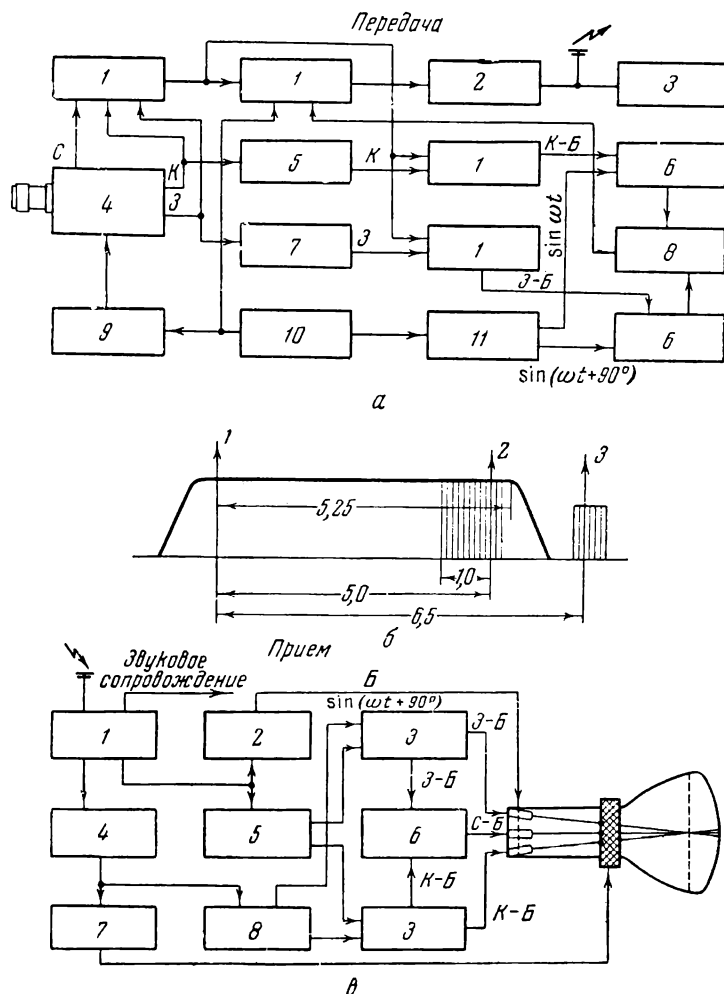


Рис. 156. Схема одновременной системы цветного телевидения с передачей разностных цветowych компонентов:

а — передающее устройство цветного телевидения: 1 — смеситель; 2 — передатчик изображений; 3 — передатчик звукового сопровождения; 4 — камера; 5 — фильтр К; 6 — модулятор; 7 — фильтр 3; 8 — фильтр-смеситель; 9 — генератор развертки; 10 — синхрогенератор; 11 — генератор 5 Мгц; б — график спектра частот, подводимых к передатчику: 1 — несущая изображения; 2 — цветовая поднесущая частота; 3 — звуковая несущая частота; в — укрупненная блок-схема приемного устройства: 1 — приемник; 2 — яркостный усилитель; 3 — демодулятор; 4 — делитель синхроимпульсов; 5 — полосовой усилитель; 6 — смеситель; 7 — генератор развертки; 8 — генератор

генератора поднесущей должна равняться нечетной гармонике от половинной строчной частоты. Колебания генератора подводятся к одному из модуляторов со сдвигом фазы в 90° против другого. При таком сдвиге фаз колебания в одном канале проходят через максимум, а в другом — через нуль. Это позволяет модулировать подводимые колебания одновременно двумя сигналами и складывать их затем в общем смесителе. Полученный

затем комбинированный сигнал замешивается в следующем смесителе с яркостным сигналом Б и направляется к модулятору основного радиопередатчика. Спектр частот, подводимый к передатчику, показан на рис. 156, б. Как видно, он занимает ограниченную полосу частот, не превышающую ширины полосы (порядка 6 Мгц), обычно используемой для передач черно-белого телевидения.

В качестве передающей телевизионной камеры в данной системе может использоваться в принципе любая камера, производящая одновременный анализ передаваемого изображения по трем цветным компонентам. Одним из возможных вариантов устройства подобной камеры может служить система с тремя передающими трубками, в которой для выделения цветных компонент изображения используется светоразделительное устройство, составленное из интерференционных цветоизбирательных зеркал. Действие такой системы происходит следующим образом. Лучи от объекта проектируются объективом на два перекрестностоящих цветоизбирательных зеркала. Одно зеркало, свободно пропуская зеленые и синие лучи, отражает красные лучи на фотокатод первой передающей трубки. Другое зеркало, свободно пропуская красные и зеленые лучи, отражает синие лучи на фотокатод второй передающей трубки. Зеленые лучи свободно проходят через оба зеркала на фотокатод третьей трубки. Развертка красного, зеленого и синего изображений производится согласованно на трех трубках, а сигналы красной, зеленой и синей компонент деталей изображения снимаются одновременно с сигнальных пластин трех трубок. Аналогичные системы передающих устройств возможно осуществить и с одной передающей трубкой.

Для приема цветной картины наиболее целесообразно применять трехлучевую телевизионную трубку с цветным растровым экраном. В этой трубке три электронных прожектора помещены под некоторым углом один к другому в общем баллоне. В плоскости пересечения лучей перед экраном трубки ставится диск с большим числом маленьких отверстий. При развертке лучей общим магнитным полем катушки они, проходя через отверстия, всегда будут падать от каждого прожектора на разные точки светящегося слоя экрана. Так, луч от правого прожектора всегда будет падать на экран слева от центрального луча, а луч от левого прожектора — справа от него. Таким образом, на экране образуется семейство фиксированных относительно лучей точек, совокупность которых из них составит один элемент изображения. Эти фиксированные точки покрываются люминофорами трех основных цветов, образуя сложный трехцветный экран. Люминофоры наносятся на экран путем напыления через решетку под углами направления лучей от соответственных электронных прожекторов так, что люминофор синего свечения покрывает одни точки экрана, люминофор зеленого свечения — другие точки, люминофор красного свечения — третьи. Укрупненная блок-схема приемного устройства с такой трубкой приведена на рис. 156, в.

Принимаемый сложный сигнал в приемном устройстве делится на яркостный сигнал Б и цветные компоненты. Яркостный сигнал подается на управляющий электрод трехлучевой цветной трубки, а цветные компоненты подводятся к соответствующим демодуляторам. Демодуляторы питаются от вспомогательного генератора, как и модуляторы в передатчике. Благодаря этому в демодуляторах выделяются разностные сигналы (К — Б) и (З — Б), подаваемые на два электронных прожектора приемной трубки. Помимо этого, сигналы подаются в смеситель для восстановления третьего основного цвета, в данном случае синего, в виде разностного сигнала (С — Б), который подается на третий прожектор приемной трубки. В результате такого воздействия на три электронных луча, выходящих из прожекторов, на экране приемной трубки будет воспроизводиться цветное изображение.

В описанной схеме цветного воспроизведения ограничение полосы частот телевизионного изображения стандартной полосой достигается, как можно заметить, благодаря тому, что мелкие детали изображения передаются в виде серых тонов и цветная окраска сообщается только более крупным деталям изображения. Такая система воспроизведения цветной картины хорошо согласуется с физиологическими особенностями зрительного восприятия разных цветов с различной разрешающей способностью. Наибольшая острота зрения наблюдается при желтом и зеленом свете и наименьшая — при красном и синем. Известно также, что цветности отдельных мелких и слабо освещенных деталей объекта глаз неспособен различать. Таким образом, сужение полосы частот в описанной системе цветного телевидения достигается посредством удаления из передачи лишней информации, которую глаз не в состоянии использовать.

Описанная система позволяет получать цветные изображения высокого качества. Особым преимуществом этой системы является возможность приема цветной программы на существующие телевизоры в виде черно-белого изображения, поскольку передаваемый яркостный сигнал Б ничем не отличается от сигналов обычных телевизионных передач. Эта система допускает принципиальную возможность превращения черно-белого телевизора в цветной, для чего потребуются только замена в телевизоре обычной однолучевой трубки новой трехлучевой трубкой (с добавочным питанием) и добавление к телевизору приставки с блоками для воспроизведения цветов. В описанной системе телевидения характерен метод воссоздания цветной окраски изображения путем передачи дополнительной информации о цвете, сопровождающей обычную передачу сигналов черно-белого изображения. При этом важно отметить то обстоятельство, что объем дополнительной информации небольшой в сравнении с объемом основной информации, служащей для воспроизведения черно-белого изображения. Это позволяет рационально строить новую систему цветного телевидения, укладываясь в полосу частот и прочие стандарты обычного черно-белого телевидения.

Весьма вероятно, по аналогии с рассмотренной системой добавления цвета к черно-белой телевизионной передаче таким же путем удастся передать ограниченный объем дополнительной информации, необходимой, чтобы придать объемность телевизионному изображению. В этом случае характеристика объемности изображения передавалась бы аналогично характеристике цвета и звука сопровождающую обычную черно-белую телевизионную передачу дополнительной информацией. Такая передача представляла бы собой универсальную телевизионную систему, могущую приниматься в зависимости от класса приемного устройства либо в виде черно-белого изображения, либо цветного и дополнительного объемного изображения.

Принцип осуществления подобной системы можно представить себе следующим образом. Предположим, что в передающем стереотелевизионном устройстве одновременно разворачиваются две сопряженные строки правого и левого изображений стереопары. В данном случае, если передаваемые этой строкой детали картины располагаются в одной плоскости (параллельной плоскости экрана), расположение элементов изображения в обоих строках будет вполне идентичным. Допустим теперь, что одна из деталей объекта, передаваемая этой строкой, не совпадает с плоскостью расположения остальных деталей. Тогда элемент изображения, передающий эту деталь, окажется не одинаково расположенным на правой и левой строках. Параллактический сдвиг элемента может быть охарактеризован разностью спектров развертки строки правого и левого изображений. Аналогичным образом разностью спектров развертки правого и левого изображений могут быть охарактеризованы параллактические сдвиги и других точек соответственных изображений, передающих простран-

ственно расположенные на разных глубинах детали объекта. Естественно, для деталей изображения, лежащих в плоскости экрана, развертку элементов правого и левого изображений можно вести одинаковыми телевизионными сигналами.

В том случае, если потребуется воспроизвести деталь, выходящую из экранной плоскости вперед или назад, необходимо придать соответственно положительный или отрицательный параллактический сдвиг одному из лучей. Такие сдвиги лучей (развертывающих одновременно одинаковые элементы изображения) могут достигаться, например, временным сдвигом или дополнительной скоростной модуляцией одного из лучей (или симметричным сдвигом обоих лучей). Очевидно, дополнительная скоростная модуляция луча может управляться значительно меньшим объемом информации, чем требуемый объем информации для независимого воспроизведения второго изображения стереопары. Так как для передачи меньшего объема информации требуется меньшая полоса частот, то, следовательно, для двухлучевого воспроизведения стереоскопической пары изображений одинаковыми сигналами, но с дополнительным управлением параллактическими сдвигами лучей потребуется значительно меньшая ширина канала радиосвязи, чем ширина канала при независимой передаче этих же изображений стереопары.

Перспективы практической разработки подобной системы возможны только на основе использования принципов, рассматриваемых теорией информации. Весьма возможно, что более эффективное сужение полосы частот, необходимых для передачи полноценного изображения в цвете и объеме, может быть достигнуто также в результате применения более рациональной системы управления временной разверткой телевизионной картины. Однако на сегодняшний день технические решения подобных задач достаточно сложны.

Значительно проще строится практически приемлемая система стереоскопического цветного телевидения при использовании физиологических особенностей бинокулярного смещения цветов. Рассмотрим несколько примеров, указанных проф. П. В. Шмаковым.

В системе стереотелевизионной передачи с применением двух передающих трубок одна из них может служить для передачи только одного основного цвета, а другая — для передачи двух других цветов. Этого можно достичь, например, прикрыв первую трубку зеленым светофильтром, а вторую вращающимся диском с красным и синим светофильтрами. Тогда одно изображение стереопары, например левое, будет передаваться в зеленых тонах, а правое — в красных и синих. В передающем устройстве можно обойтись и без вращающегося диска, если для анализа изображения воспользоваться тремя передающими трубками. Вместо вращающегося диска перед правой трубкой в данном случае помещается цветоизбирательное зеркало, свободно пропускающее красные лучи к правой трубке и отражающее зеленые лучи на третью трубку. Как и в первом случае, левое изображение будет передаваться с одной трубки в зеленых тонах, а правое изображение с двух трубок в красных и синих тонах. Для последовательной передачи цветов левого и правого изображений необходимо каждую трубку включать лишь на соответствующий промежуток времени.

Прием левого и правого цветных изображений при последовательной их передаче в простейшем случае может осуществляться на одну приемную трубку с вращающимся диском, несущим цветные светофильтры зеленого, красного и синего цветов, прикрытые чередующимися поляроидами. Для раздельного видения стереопары левый глаз должен быть прикрыт поляроидом, пропускающим зеленый цвет, а правый — пропускающим два цвета — красный и синий. При применении телевизионных приемников проекционного типа оптическая часть может быть выполнена с цветоизбирательными зеркалами или с обычными светофильтрами, прикрытыми

поляроидами. Приемные трубки должны иметь последовательное включение, синхронное с включением передающих трубок. При безочковой стереопроекции с сепарацией изображений растровым экраном вместо очков перед проекционным экраном со стороны зрителя должен быть поставлен растровый экран того или иного типа. Кроме того, на экране должна быть образована параллаксаграмма стереопары, например, путем вертикальной развертки левого и правого изображений как в передатчике, так и в приемнике.

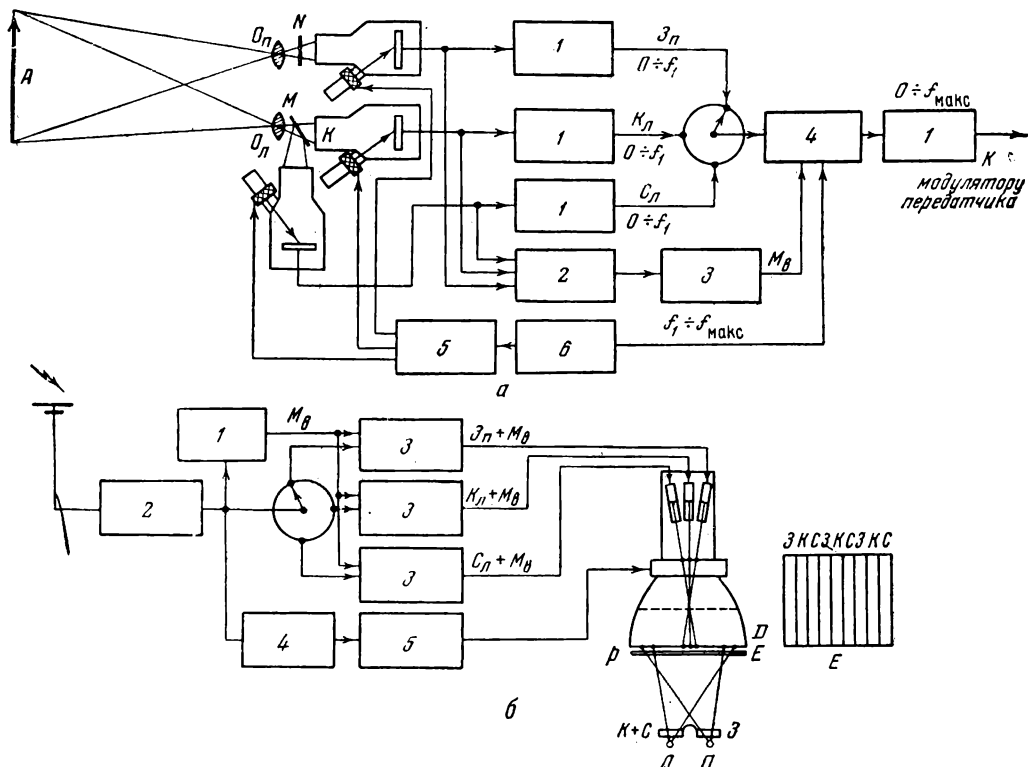


Рис. 157. Блок-схема одновременной системы трехцветного объемного телевидения:
 а — блок-схема передатчика; 1 — фильтр н. ч.; 2 — смеситель I; 3 — фильтр в. ч.; 4 — смеситель II
 5 — развертывающее устройство; 6 — синхрогенератор
 б — блок-схема приемника; 1 — фильтр в. ч.; 2 — радиоприемник; 3 — видеосигнализатор; 4 — синхроделиватель; 5 — развертывающее устройство

Со стороны наиболее эффективного использования каналов связи представляет особый интерес система одновременной передачи цветных стереоскопических изображений. Принимая во внимание соотношения, в каких находятся острота зрения и критическая частота мельканий (для основных цветов в сочетании с черным полем), можно заметить, что при наблюдаемой четкости зеленого изображения в 625 строк и проекции 25 кадров в секунду глаз способен различать только 312 строк синего изображения и 543 строки красного (при критических частотах, соответствующих передаче 12,5 и 18,75 кадра в секунду). Этим параметрам передачи будет соответствовать стандартная полоса частот для зеленого канала в 6 Мгц, для синего канала 0,75 Мгц, для красного канала 3,0 Мгц. Таким образом, в пределах полосы частот, равной 9,75 Мгц, может функционировать трехцветная система объемного телевидения, без каких-либо дополнительных мероприятий. Но если учесть опытный факт, что при разном качестве левого и правого изображений стереопары качество

объемного изображения определяется лучшим из них, то полоса «красного» канала, вероятно, может быть еще снижена. Опыт также показывает, что при потере телевизионного стереоэффекта в мелких деталях на удаленных расстояниях объемность крупных предметов и более близкого плана сохраняется. Это говорит о том, что в объемном телевидении, как и в цветном, допустима смесь высоких частот при передаче левого и правого изображений. Допустимые пределы должны быть определены на опыте, тем более что они, очевидно, будут разными для студийных, театральных и вне-студийных натуральных передач. Для смеси высоких частот может быть использована или ступенчатая развертка трех кадров, или импульсная развертка с коммутацией трех видеоканалов. Примерная блок-схема стереоцветной системы для последнего случая представлена на рис. 157. Отличие ее от аналогичной системы цветного телевидения заключается лишь в наличии в передающей камере двух объективов вместо одного, наличии у приемника растрового экрана *P*, составленного из чередующихся полосок поляроидов, соответственно прикрывающих левые и правые элементы параллаксаграммы, и наличии поляроидных очков у зрителей. В передатчике (рис. 157, а) в качестве светофильтров показаны цветотрибыльные зеркала *M* и *N*. В качестве приемной трубки (рис. 157, б) показана трехлучевая трубка с растровой решеткой *D*. Экран *E* трубки покрыт цветными люминофорами в виде узких вертикальных штрихов. Сепарация стереоскопических изображений в рассмотренной трехцветной системе телевидения осложняется тем, что одним глазом должны быть восприняты два цвета, а другим — один цвет. Для осуществления такой сепарации может служить, например, приемная трехлучевая трубка. Люминесцирующий экран трубки в данном случае образуется штрихами люминофоров разных цветов. Перед экраном устанавливается растр из цилиндрических линз для возможности раздельного наблюдения левым и правым глазом соответственных изображений стереопары.

Совмещение цветного воспроизведения телевизионных изображений с объемным особенно просто решается при синтезе цветного изображения из двух цветовых компонент и бинокулярном смешении цветов. Однако при бинокулярном смешении цветов все же не предотвратимы некоторые искажения окраски одноцветных предметов, особенно близких по оттенкам к основным цветам.

Глава VI

ПРИМЕНЕНИЕ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И УЧЕБНЫХ ЦЕЛЯХ

§ 1. Стереоскопический метод исследования. § 2. Применение стереоскопических зрительных приборов для наблюдения удаленных объектов. § 3. Применение стереоскопических исследований в астрономии. § 4. Использование стереокомпаратора для обмера стереограмм. § 5. Применение стереоскопических приборов для рассматривания мелких микроскопических объектов. § 6. Применение стереоскопических методов в биологии и медицине. § 7. Стереоскопические рентгеноисследования. § 8. Стереоскопический метод идентификации объектов.

§ 1. СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение пространственной картины какого-либо явления оказывается наглядным при применении стереоскопического метода исследования. Этот метод дает наблюдателю возможность получить сразу непосредственное восприятие пространственной картины исследуемого объекта без каких-либо сложных вычислений или графических построений, которые необходимо делать при изучении пространственной картины на основании рассмотрения отдельных проекций, получаемых, например, на двух взаимно-перпендикулярных плоскостях.

Стереоскопические исследования позволяют очень быстро обнаруживать глазом все особенности сложного пространственного явления. Так, например, рассматривая стереоскопические снимки горной местности, можно легко и быстро обнаружить ее рельеф. Применяя стереоскопическую съемку в кристаллографии, можно непосредственно выявлять особенности строения кристаллов. Стереоскопические снимки аэродинамических процессов и движения жидкости с большей наглядностью показывают пространственное образование вихрей и пр.

Стереоскопическое наблюдение явлений не ограничивается только качественной стороной их изучения. По стереоскопическим снимкам можно делать и количественную оценку различных сторон изучаемых процессов, так как два изображения стереограммы являются двумя проекциями, полученными из центров, смещенных один от другого на определенный базис. Зная величину этого базиса и увеличение получаемых изображений на стереограмме, можно с большой точностью вычислить все пространственные соотношения исследуемой картины.

Для точного анализа пространственных соотношений, зафиксированных на стереограмме, существует ряд более или менее сложных измерительных приборов. Измерения пространственных соотношений в стереоскопическом изображении с большой точностью могут быть сделаны и чисто визуально при помощи стереоскопа и особых стереоскопических масштабных сеток или стереоскопических шкал. Помимо большой быстроты визуального изучения пространственной картины, стереоскопический метод исследования дает и большую точность в фиксации наблюдаемых явлений. Острота стереоскопического зрения превышает остроту зрения глаза, наблюдающего плоское изображение.

В настоящее время стереоскопический метод исследования распространен во многих областях науки и техники. Этот метод используется и в астрономических исследованиях и в микробиологии. Значительные успехи достигнуты при применении стереоскопического метода в рентгеноскопических исследованиях.

Несомненно, важной областью применения стереоскопических методов можно считать измерения расстояний и топографическое изучение самых различных объектов. Стереоскопические методы измерения расстояний позволяют производить очень быстрое определение результатов этих измерений. Для измерения расстояний, основанных на стереоскопическом восприятии глубины пространства, создан ряд разнообразных оптических инструментов, начиная от бинокля, стереотрубы и кончая стереодальномерами и фотограмметрическими приборами, позволяющими наиболее точно определять рельеф предметов по фотографически фиксированной стереограмме.

Характерно, что стереоскопический метод исследования широко проник в область аэрофотосъемки. Для стереофотограмметрического анализа снимков сконструированы различного рода аппараты. Высотная аэрофотосъемка в значительной мере основывается на методах стереоскопических исследований с применением специальной стереофотограмметрической обработки снимков.

Стереоскопический метод исследования применяется в разных областях науки: в аэро- и гидродинамике при изучении газов, жидкостей, процессов горения, взрывов и пр., в метеорологии, в частности, для съемки и изучения движения облаков. Стереоскопические снимки позволяют легче определять формы нерезко очерченных и слабо видимых предметов. Поэтому они полезны при исследовании многих процессов, изучаемых при химических превращениях и физико-химических явлениях. Такие науки, как археология и геология, в настоящее время широко применяют стереоскопическое фотографирование в своих исследованиях. В последнее время стереоскопический метод применяется в радиолокации для наблюдения удаленных предметов, скрытых от глаз наблюдателя темнотой или атмосферными помехами. Стереоскопические способы измерений и наблюдения используются в геоморфологических исследованиях строения земной коры, в гидрографии при изучении движения волн, при проектировании путей сообщения, при изучении структуры материалов, деформации сооружений и во многих других случаях.

Стереоскопические методы исследования в последнее время применяются и при изучении ядерных процессов для наблюдения треков элементарных частиц, а также в электронной микроскопии для более детального изучения микроскопических объектов.

На рис. 158 приведена схема для стереоскопического фотографирования пути ионизирующих частиц в большой камере Вильсона при помощи освещения ее двумя импульсными лампами на просвет.

Однако стереоскопический метод фиксации и воспроизведения пространственной картины изучаемых объектов применяется не только для научных исследований, но и в учебном процессе. В настоящее время стереоскопическая проекция уже широко используется при техническом обучении летчиков, медиков и многих других специалистов. Стереоскопические иллюстрации — хорошие наглядные пособия к учебным курсам физики, математики и т. д. На листах XX—XXIII приведены стереограммы к курсу начертательной геометрии¹.

Широко известно применение стереоскопических топографических карт, выполненных анаглифической печатью, которые в последнее время

¹ Рисунки взяты из книги И. Пал «Начертательная геометрия с анаглифическими иллюстрациями». Издательство технической литературы, Будапешт, 1961 (на русском языке).

изготавливаются также по методу «Вектографа». Стереоскопические снимки в качестве наглядных пособий полезны при изучении различных учебных дисциплин, особенно географии. Благодаря таким снимкам учащиеся легко ознакомятся с особенностями флоры и фауны изучаемых стран, с архитектурными и скульптурными памятниками. Большим подспорьем для наглядности обучения стереоскопические снимки являются в таких дисциплинах, как геометрия и оптика. Многие геометрические представления, в особенности в области стереометрии, очень трудно воспринимаются учащимися по плоским рисункам. Стереоскопическое рассматривание таких пространственных геометрических фигур делает материал

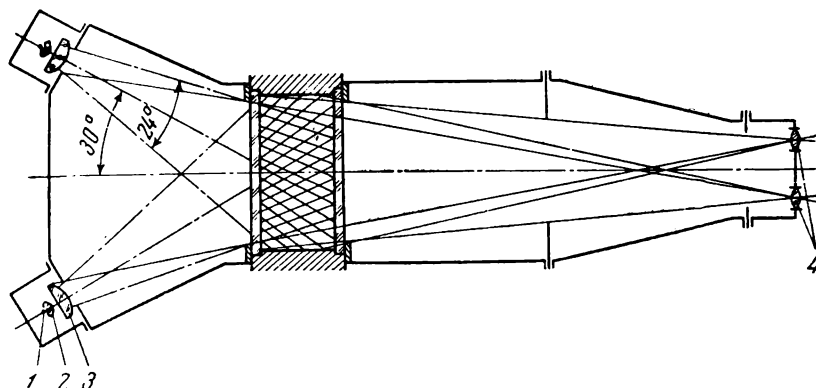


Рис. 158. Схема стереоскопического фотографирования путей элементарных частиц в камере Вильсона на просвет:

1 — импульсная лампа; 2—3 — линзы конденсора; 4 — объективы стереофотоаппарата

очень доходчивым. В настоящее время известны даже целые курсы стереометрии, иллюстрированные такими стереоскопическими рисунками. Примеры стереограмм, иллюстрирующих трудные геометрические представления по курсу теоретической физики, даны на листе XXIV. Особенно трудно учащиеся представляют пространственный ход лучей через сложные оптические системы, направления колебаний различно поляризованного света и т. п. В этом случае рассматривание стереоскопических рисунков облегчает учащимся понять эти процессы. При изучении химии не менее полезны стереоскопические снимки моделей, изображающие строение сложных молекул. Стереограмма пространственной структуры пирита FeS_2 воспроизведена на листе XXIV внизу. Наглядные стереоскопические пособия имеют существенное значение для обучения в области техники, например при изучении работы сложных механизмов, двигателей внутреннего сгорания, управления автомобилем, самолетом и т. д.

Помимо учебного процесса в самых разнообразных областях науки и техники, стереоскопическая фотография применяется и для изучения самих процессов. В последнее время стереоскопический метод исследования применяется не только для непосредственного визуального контроля за исследуемыми процессами, но и как косвенный метод более тонкой оценки исследуемых явлений. В сочетании с электроникой стереоскопический метод открывает новые возможности в различных областях исследований. Появившиеся стереоскопические осциллографы применяются для наглядного исследования ряда процессов. На рис. 159 представлена принципиальная схема устройства одного из стереоскопических осциллографов с двумя катодными трубками, изображение на которых рассматривается при помощи зеркального стереоскопа. Электрическая схема для простран-

ственного управления наблюдаемым сигналом приведена на рис. 160. Сигнал, управляющий перемещениями луча по горизонтали, подводится к контактам X, X , сигнал, управляющий перемещениями луча по вертикали — к контактам Y, Y . Сигнал, подводимый к контактам Z, Z , вызывает параллактическое смещение лучей обеих трубок в горизонтальном направлении, чем и вызывается перемещение наблюдаемой картины по глубине.

При помощи такого рода осциллографов может производиться, в частности, и стереоскопическое наблюдение радиолокационных сигналов.

Для осуществления стереоскопической радиолокации используется посылка двух радиолокационных лучей с разнесенных на некоторое расстояние двух антенн. При посредстве особого устройства производится сканирование радио-

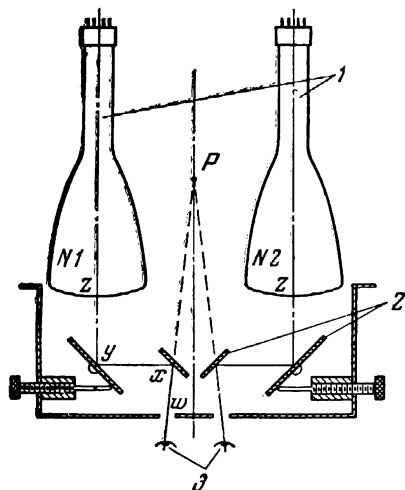


Рис. 159. Принципиальная схема устройства стереоскопического осциллографа с двумя катодными трубками:

1 — катодные трубки; 2 — зеркала; 3 — глаза наблюдателя

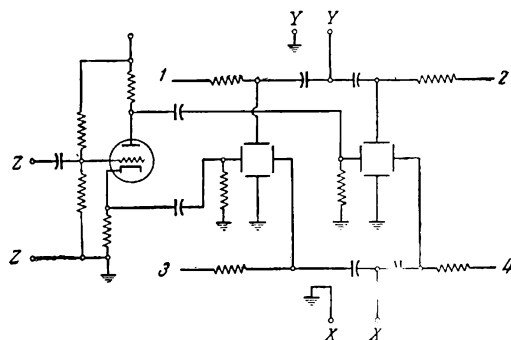


Рис. 160. Схема управления лучами на двух катодных трубках стереоскопического осциллографа:

1 — вертикальная развертка трубки № 1; 2 — вертикальная развертка трубки № 2; 3 — горизонтальная развертка трубки № 1; 4 — горизонтальная развертка трубки № 2

лучей, позволяющее разделить принимаемые сигналы между правой и левой трубкой осциллографа.

Примеры стереоскопических изображений, получаемых на стереоскопическом осциллографе, приведены на листе XXV, здесь на среднем рисунке изображена пространственная кривая изучаемого процесса, а на нижнем представлена картина цели, полученная на экране стереоскопической радиолокационной установки.

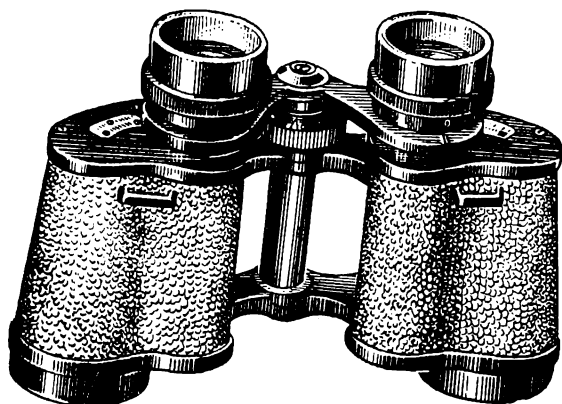
§ 2. ПРИМЕНЕНИЕ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ЗРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Невооруженный глаз человека оценивает абсолютные расстояния до удаленных предметов недостаточно точно. Если при наблюдении близких предметов пространственную форму их нам помогают определить психофизиологические факторы, лежащие в основе стереовосприятия, то при наблюдении достаточно удаленных предметов действие этих физиологических факторов ослабляется и они перестают действовать.

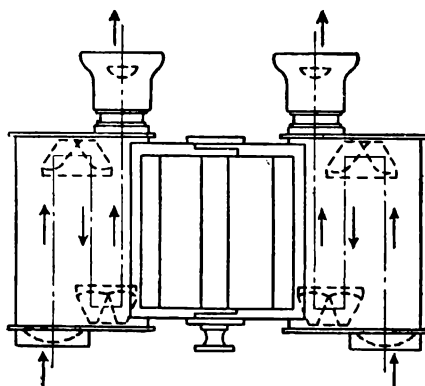
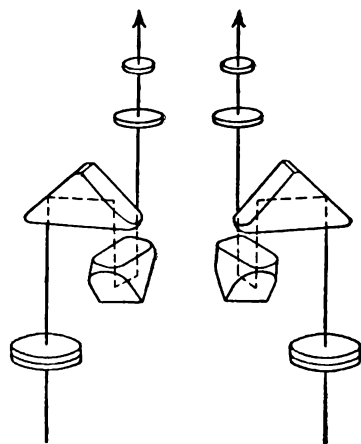
Аккомодационный механизм, как мы знаем, практически перестает действовать уже на расстояниях, превышающих 5—6 м. Действие механизма конвергенции хотя и продолжается на значительно больших расстоя-

ниях, однако само изменение напряжения конвергирующих мышц дает лишь неточное представление об удаленности рассматриваемого предмета. Роль конвергенции сводится главным образом к получению изображений от одних и тех же точек рассматриваемого предмета на соответствующих корреспондирующих точках обеих сетчаток. Попадание же при этом изображения других более удаленных или более близких точек предмета на несоответствующие диспаратные точки сетчаток и является главной причиной психофизиологического определения удаленности данной точки от фиксируемой точки предмета. Бинокулярное стереовосприятие практически ограничено для большинства людей расстоянием в 1350—1500 м. При большем удалении предметов диспаратность, т. е. несоответствие положения изображений одних и тех же точек предмета на сетчатках глаз, оказывается столь незначительной, что лежит за пределами разрешающей способности стереоскопического восприятия.

Собственно говоря, с такого расстояния в определении удаленности



a



b

Рис. 161. Полевой призматический бинокль (a) и его оптическая схема (б)

предметов уже мало помогает и глазомерная оценка. Далее рельеф исчезает, и о том, какой из предметов, находящихся в этой зоне, расположен ближе и какой дальше, человек судит, сопоставляя лишь ряд косвенных второстепенных признаков. И только такие дополнительные факторы зрительного восприятия пространства, как воздушная перспектива, делающая расплывчатыми очертания дальних предметов, наличие теней, перспективное уменьшение предметов (например, телеграфных столбов), наличие между наблюдателем и рассматриваемым предметом каких-либо промежуточных предметов или частичное перекрывание одних предметов другими, дают возможность определять взаимное положение предметов, находящихся в поле зрения на расстоянии свыше 1500 м.

Вооружив глаза человека оптическими приборами, можно искусственно увеличить диспаратность изображений наблюдаемого предмета на сетчатках. Таким путем границы стереоскопического восприятия пространства могут быть значительно расширены за пределы 1500 м, а само

определение удаленности предметов оказывается выполнимым уже со значительно большей точностью.

Увеличение диспаратности, во-первых, путем увеличения самих изображений предмета, рисуемых оптической системой на сетчатках глаза, а во-вторых, путем увеличения параллактического сдвига соответственных точек на этих двух изображениях достигается, например, при увеличении базиса наблюдения правого и левого изображений.

Простейший бинокулярный зрительный прибор — театральные бинокль, дающий увеличение наблюдаемого поля в 2,5—3 раза, уже раздвигает границу стереоскопического восприятия примерно до 4500 м. Театральные бинокли выполняются обычно по схеме зрительной трубы Галилея и имеют малое увеличение, не превосходящее, как правило, 5×, а расстояние между центрами правого и левого объектов в этих биноклях равно нормальному межзрачковому расстоянию.

Значительно большими увеличениями обладают полевые призмённые бинокли (рис. 161). Такие бинокли дают увеличение видимого поля зрения от 6 до 25 крат. Увеличение в 25 крат для них служит почти пределом. Гораздо чаще встречаются бинокли с меньшим увеличением, в 12—18 крат. Удельная пластичность призмённых биноклей, т. е. отношение величины базиса между объективами к величине нормального межзрачкового расстояния, обычно составляет от 1,75 до 2.

Таким образом, с помощью современных призмённых биноклей можно значительно увеличить дальность глазомерной оценки при определении расстояний до наблюдаемых предметов и значительно уточнить различимость самого рельефа удаленных предметов. Так, для призмённого бинокля с шестикратным увеличением и удельной пластикой, равной 2, радиус стереоскопического восприятия увеличивается до 16,2—18 км, а для такого же бинокля с 12-кратным увеличением граница стереоскопического восприятия отодвигается почти до 35 км. Однако следует иметь в виду, что на определенной таким образом границе стереоскопического восприятия оценка относительной удаленности объектов очень груба, и поэтому практически достигаемый с помощью призмённых биноклей предел для оценки расстояния во много раз меньше.

Абсолютная точность оценки расстояний между наблюдаемыми предметами, как мы определили в главе I, равна

$$\Delta d_0 = \frac{d^2 \Delta \theta_0}{B - d \Delta \theta_0},$$

где Δd_0 — наименьшая различимая разность расстояний между наблюдаемыми предметами, удаленными на расстояние d от наблюдателя; B — базис бинокля; $\Delta \theta_0$ — острота стереоскопического зрения (выраженная в угловой мере).

Если $\Delta \theta_0 = 10''$, то в радианах: $\Delta \theta_0 = 48 \cdot 10^{-6}$ рад.

Так как для вооруженного глаза острота зрения увеличивается пропорционально угловому увеличению зрительного прибора γ , то при наблюдении через бинокль порог восприятия глубины может быть выражен

$$\Delta d_0 = \frac{d^2 \Delta \theta_0}{(B - d \Delta \theta_0) \gamma}.$$

Умножая числитель и знаменатель на b , имеем

$$\Delta d_0 = \frac{d^2 \Delta \theta_0}{\left(b - \frac{d \Delta \theta_0 b}{B}\right)} \cdot \frac{b}{B \gamma}.$$

Но так как

$$\frac{B}{b} \gamma = \Pi \quad \text{и} \quad \frac{B}{b} = n,$$

где Π — полная пластика прибора, то можно написать

$$\Delta d_0 = -\frac{d^2\Delta\theta_0}{b - \frac{d\Delta\theta_0 b}{B}} \cdot \frac{b}{B\gamma} = \frac{d^2\Delta\theta_0}{b - \frac{d\Delta\theta_0}{n}} \cdot \frac{1}{\Pi}.$$

Для средних расстояний рассматривания обычно $b \gg \frac{d\Delta\theta_0}{n}$, благодаря чему величину $\frac{d\Delta\theta_0}{n}$ можно считать достаточно малой.

Следовательно, ошибки различения удаленности предметов для глаза, вооруженного биноклем, уменьшаются в Π раз.

Свойство бинокля увеличивать различимость глубины пространства легко проверить на опыте, если рассматривать в бинокль, например, не особенно удаленные деревья. Наблюдаемые невооруженным глазом, все группы деревьев будут казаться находящимися на одном расстоянии, между тем при рассматривании в бинокль становятся заметны промежутки между отдельными группами деревьев. Различимость промежутков между различно удаленными предметами оказывается тем лучшей, чем больше угловое увеличение бинокля и чем больше у него базис между объективами, иными словами, чем больше его полная пластика.

Практическое осуществление бинокля с большой пластикой приводит к очень громоздкой конструкции прибора или к необходимости ограничения поля зрения бинокля, что нежелательно. Какое значение для наблюдения имеет величина поля зрения, видно из рис. 162, где изображен один и тот же участок при наблюдении его в различных условиях. Рис. 162, *а* соответствует картине, которая видна через зрительную трубу с малым полем зрения. Рис. 162, *б* соответствует прежней картине, на которую наведен бинокль 6-кратного увеличения. Наконец, рис. 162, *в* относится к случаю наблюдения в призмный бинокль также 6-кратного увеличения, обладающий значительно большим полем зрения; здесь мы при большом поле зрения также хорошо различаем детали. Из рассмотрения этой иллюстрации видно, как важно при значительном увеличении зрительного прибора иметь большое поле зрения.

Поле зрения оптического прибора всегда меньше поля зрения окуляра этого прибора во столько крат, сколько крат имеет угловое увеличение прибора. Так, например, применяя окуляр с полем зрения 50° , при 6-кратном увеличении зрительной трубы можно получить лишь поле зрения прибора не свыше 8° , а при 8-кратном увеличении прибора — поле зрения не свыше 6° . Только современный сложный окуляр, имеющий поле зрения 70° , позволяет получить поле зрения для 8-кратных биноклей, доходящее до 9° .

Очевидно, для создания бинокулярных зрительных приборов с большим полем зрения и в то же время обладающих значительной пластичностью остается единственная реальная возможность — увеличить базис между объективами. Такими оптическими приборами являются стереотрубы. В этих приборах благодаря большому базису полная пластичность может достигать очень больших значений, примерно до 120. Стереотруба в принципе является призмным биноклем с очень большой удельной пластичностью, которую можно изменять в зависимости от раздвижения объективов прибора. Увеличение стереотрубы обычно бывает от 10- до 20-кратного. Общий вид наиболее распространенной стереотрубы изображен на рис. 163, *а*. Она состоит из двух одинаковых зрительных труб, соединенных парным, позволяющим раздвигать обе трубы до горизонтального положения. В этом положении стереотруба обладает наибольшей пластичностью. При сведенном положении пластичность стереотрубы приблизительно соответствует пластичности обыкновенного призмного бинокля. При любом разведении труб между окулярами сохраняется постоянно одинаковое расстояние.

Оптическая система стереотрубы схематично изображена на рис 163, б, где показан разрез одной половины прибора. Оптическая система состоит из головной отражательной призмы *P*, объектива *O*, призмы *B*, клиновидной призмы *K* и окуляра *Q*. Через призму, которая стоит перед объективом, лучи света входят в трубу и направляются к окуляру. Призмы, стоящие за объективом, отклоняют лучи на 90° от первоначального их



Рис.162.Картина, наблюдаемая при различных ограничениях поля зрения

направления и вместе с тем вследствие двукратного отражения производят полное оборачивание изображения, что позволяет получить перед окуляром прямое изображение предмета.

Обычная стереотруба имеет максимальный базис, равный 750 мм, вследствие чего удельная пластичность при разведенных трубах достигает 12, а при сведенных — около 3. Увеличение такой трубы 10-кратное, и она имеет поле зрения около 5° . Стереотруба является универсальным оптическим прибором, позволяющим пользоваться ею как дальномерным измерительным прибором.

Дальномерные свойства стереотрубы можно иллюстрировать следующим примером. Предположим, что стереотруба с максимальным базисом,

т. с. с разведенными коленами, употребляется для наблюдения разрыва снарядов, а цель находится на расстоянии 4 км. Воспользуемся приведенной выше формулой точности оценки дистанции при наблюдении в бинокулярный прибор и, имея в виду, что для данного случая максимальный базис трубы $B = 0,75$ м, увеличение $\gamma = 10$, разрешающая способность

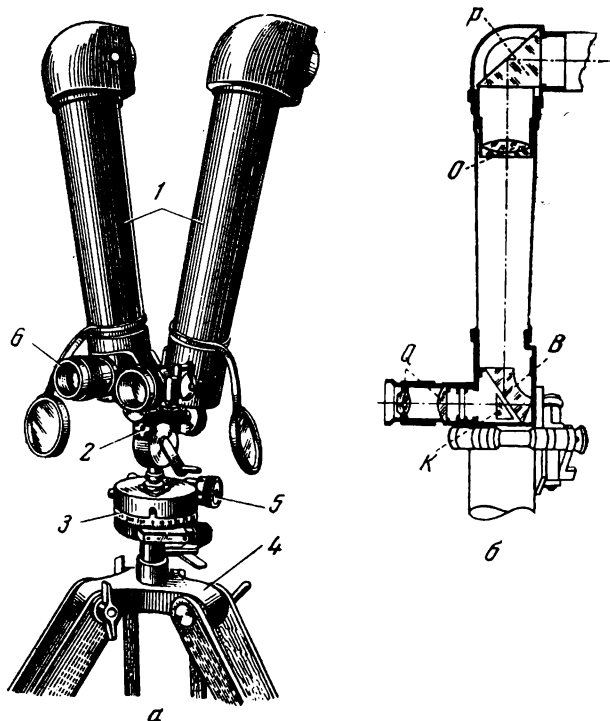


Рис. 163. Стереотруба:

а — общий вид стереотрубы: 1 — зрительные трубы; 2 — держатель; 3 — лимб; 4 — тренога; 5 — барабан угломера; б — окулярная раковина; б — оптическая схема стереотрубы

стереоскопического зрения $\Delta\theta_0 = 10''$, т. е. $\Delta\theta_0 = 48 \cdot 10^{-6}$, определим порог восприятия глубины.

$$\Delta d = \frac{d^2}{(B - d\Delta\theta_0\gamma)} \Delta\theta_0 = \frac{4000^2 \cdot 48 \cdot 10^{-6}}{(0,75 - 4000 \cdot 48 \cdot 10^{-6}) \cdot 10} \approx 130 \text{ м.}$$

Следовательно, на расстоянии 4 км от цели наблюдатель сможет достаточно ясно различить разрыв, не долетевший до цели или перелетевший за цель на 130 м, даже в тех случаях, если цель не будет захватываться облаком разрыва. Специально для корректирования артиллерийской стрельбы изготовлялись горизонтально-базисные стереотрубы с базами в 60 см, 3 м и 5 м со смещенными окулярами для различных увеличений. Эти трубы применяются для морской, крепостной и зенитной артиллерии и т. п. Известно много конструкций и типов стереотруб, но по своей принципиальной схеме все они мало отличаются от рассмотренной нами. Большие стереотрубы укрешаются на довольно тяжелых и сложных штативах, а малыми стереотрубамн можно пользоваться даже без штатива, держа стереотрубу в руках.

Стереотрубы позволяют вести наблюдение объектов из-за укрытий, выставляя из-за бруствера, из-за дерева лишь концы труб прибора. Это свойство прибора называется перископичностью; особенно ценно оно в военной обстановке. Перископичность обычной артил-

лерийской стереотрубы, т. е. удаление входного отверстия трубы от окуляра, составляет около 300 мм. Известны стереотрубы с очень большой перископичностью. Одним из таких бинокулярных зрительных приборов является гипоскоп. Верхние трубы этого прибора, в которых заключены головные призмы, могут раздвигаться на расстояние до 3,3 м. При 15-кратном увеличении, которое имеет прибор, удельная пластичность достигает 750.

Из других перископических бинокулярных зрительных приборов можно указать на бинокулярный перископ для подводных лодок. Такой прибор пока получил применение лишь в качестве дальномера. Один из английских горизонтально-базисных перископов-дальномеров имеет длину 6 м, базис 2,7 м, увеличение оптической системы 20-кратное. Он позволяет оценивать расстояния на дистанции в 1 км с точностью до 1 м, а на расстоянии в 5 км — с точностью до 24 м.

Применение стереоскопических зрительных труб полезно в экспедиционной работе географов, геологов, в строительном деле, для моряков, артиллеристов и многих других лиц в их практической деятельности. Особенно ценны стереоскопические зрительные трубы, снабженные устройствами, при помощи которых можно измерять расстояния до наблюдаемых предметов.

§ 3. ПРИМЕНЕНИЕ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В АСТРОНОМИИ

Возможность получать сведения о пространственном расположении рассматриваемых предметов посредством стереоскопического наблюдения чрезвычайно ценна для астрономических исследований. Чтобы получить зрительное впечатление о размещении удаленных объектов, приходится пользоваться значительным базисом между точками наблюдения правого и левого изображений. Для получения заметного различия в пространственном расположении астрономических объектов требуется иметь базис между точками наблюдения правого и левого изображений, измеряемый сотнями тысяч, миллионами километров и более. Ни один земной инструмент не может иметь такого базиса. Однако обойти это затруднение можно путем одновременного фотографирования сопряженной пары изображений исследуемого объекта с двух различных точек земной орбиты и последующего рассматривания такой пары изображений в стереоскопе. При такого рода фотографировании можно получать парные стереоскопические снимки звездного неба, сделанные из двух точек зрения, разделенных очень большим базисом.

Таким способом удалось получить стереоскопические снимки, дающие некоторое представление о пространственном расположении планет, комет и других тел солнечной системы на фоне звезд в очень удаленных созвездиях. Однако большие скорости собственных движений звезд обычно в несколько раз перекрывают параллактические смещения, получаемые на фотографиях. Поэтому для вычисления параллаксозвезд невозможно пользоваться только стереоскопическими снимками. Для этой цели применяются различные другие косвенные методы определения параллаксозвезд. Но по вычисленным уже параллаксам можно построить стереоскопические карты звездного неба, дающие наглядное представление о пространственном расположении отдельных звезд. Этим способом удается запечатлеть и редкие астрономические явления.

Особенно интересны снимки малых планет, пространственное расположение которых в настоящее время изучается почти исключительно по стереоскопическим снимкам. Стереоскопические снимки звездного неба, сделанные одновременно, помогают открывать переменные звезды, так как благодаря изменению их яркости они получаются на снимках, сделан-

ных в разное время, неодинаково экспонированными по плотности, вследствие чего при наблюдении стереоскопического снимка они обнаруживаются благодаря получаемому впечатлению характерного блеска.

Стереоскопические снимки очень удаленных звезд не дают наглядного представления об их истинном взаиморасположении в пространстве, так как за промежуток времени, необходимый для получения требуемого большого базиса между первым и вторым снимками, эти звезды сами передвигаются на очень большие расстояния, и получаемые практические сдвиги звезд на снимках определяются уже не столько их пространственным расположением, сколько собственным передвижением отдельных звезд. Однако стереоскопическое изучение таких снимков полезно для косвенного получения сведений о процессах, происходящих в удаленных звездных мирах.

Пользуясь другими применяемыми в астрономии методами определения звездных расстояний, можно искусственно построить звездные стереограммы, позволяющие наглядно представить пространственное расположение отдельных звезд. На основании изучения пространственного расположения близких к нам звезд оказалось возможным построить стереограмму 25 ближайших к Солнцу звезд, приведенную на листе XXVI. Эта стереограмма соответствует точке зрения, удаленной от земли на 100 световых лет, причем стереоскопический базис между точками соответствует удаленности друг от друга в 26 световых лет. С помощью стереоскопической фотографии оказывается возможным показать также поверхность планет нашей солнечной системы. На среднем рисунке листа XVI представлена стереограмма Сатурна. Планета кажется свободно висящей на фоне звездного неба.

Особенно интересны стереоскопические снимки поверхности Луны и Солнца. Один из таких снимков поверхности Луны приведен на листе XXVI. Хотя Луна обращена к нам всегда одной и той же стороной, но вследствие незначительного покачивания лунного шара, называемого либрацией, удастся заглянуть через значительный промежуток времени за край Лунного диска, т. е. взглянуть на Луну с несколько различных точек зрения. Приведенный выше стереоскопический снимок Луны соответствует базису между точками съемки, определяемому расстоянием около 1000 км.

Для измерения параллаксов на парных астрономических снимках обычно пользуются специальными стереоскопическими измерительными приборами. Наиболее широкое применение получил измерительный прибор, называемый стереокомпаратором.

§ 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТЕРЕОКОМПАРАТОРА ДЛЯ ОБМЕРА СТЕРЕОГРАММ

С т е р е о к о м п а р а т о р является простейшим прибором, позволяющим довольно точно измерять параллаксы точек на изображениях стереограмм. Общий вид стереокомпаратора изображен на рис. 164. Этот прибор состоит из бинокулярного зрительного устройства 4 и каретки 1 с держателями для двух пластинок с сопряженными изображениями стереограммы, могущих взаимно перемещаться по двум координатам при помощи двух параллактических винтов 2 и 3. Обычно каретка перемещается по одной координате (вдоль базиса), а зрительное устройство — по другой в перпендикулярном направлении с помощью винта 5. Измерительным приспособлением служит бинокулярный микроскоп, имеющий обычно 6-кратное увеличение. Один из держателей, как правило несящий правую пластинку, допускает взаимное перемещение пластинок. Возможны также параллельные перемещения пластинок по двум взаимно перпендикулярным осям, а также и повороты пластинок вокруг их цент-

ров, которые производятся микрометрическими винтами. Каретка с двумя изображениями стереограммы располагается на приборе таким образом, чтобы объектив каждого микроскопа был направлен на соответственные точки пластины и изображения соответственных звезд по возможности совпадали. Для этого применяют иногда бинокулярный микроскоп с переменным базисом между объективами. Если пластинки совершенно одинаковы по масштабу и положениям звезд и одинаково ориентированы, то все звезды будут казаться лежащими в одной картинной плоскости.

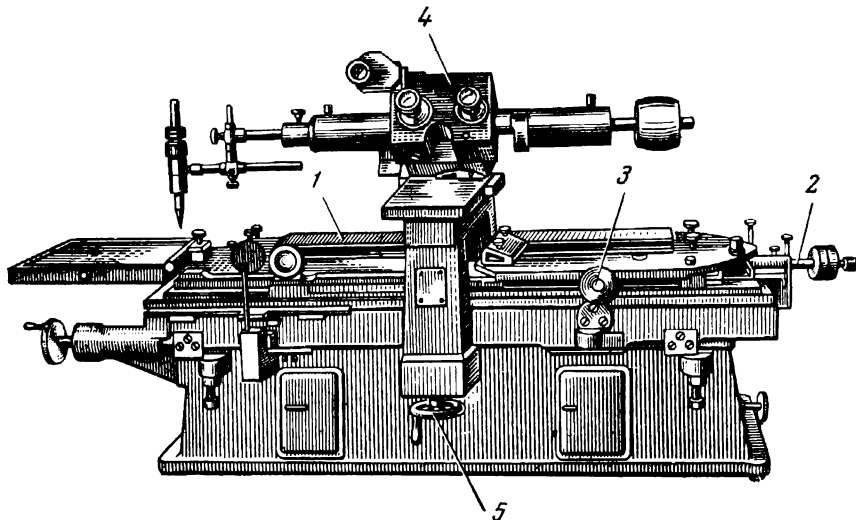


Рис. 164. Общий вид стереоскопического компаратора:

1 — каретка; 2, 3 — параллактические винты; 4 — бинокулярная система (объективы, призмы, окуляры); 5 — винт, обеспечивающий движение бинокулярной системы в направлении, перпендикулярном движению каретки

Лишь звезды, имеющие заметное собственное движение, будут казаться ближе или дальше звездного фона, смотря по направлению их смещения. В случае рассматривания прямого изображения, если расстояние между соответствующими изображениями объекта на двух пластинках больше, чем между изображениями других объектов, то объект будет казаться находящимся за картинной плоскостью. Если это расстояние меньше, то объект будет казаться находящимся перед картинной плоскостью.

На рис. 165 показаны три точки A , B , C , удаленные на различные расстояния от наблюдателя. Спроектированные на картинную плоскость изображения этих точек для левого глаза будут изображаться точками A_I , B , C_I , а для правого глаза — точками A_{II} , B , C_{II} . Если же раздвинуть картину, видимую правым и левым глазом, поместив спроектированную точку (B) для правого глаза в положение точки B_{II} , то соответственно этому точка A_{II} перейдет в положение A'_{II} , а точка C_{II} — в положение C'_{II} .

Совершенно очевидно, что для точки A , лежащей ближе к наблюдателю, расстояние между изображениями A_I и A'_{II} будут меньше, чем для точки C , лежащей дальше от наблюдателя, т. е.

$$A_I A'_{II} < B B'_{II} < C_I C'_{II}.$$

Некоторые неодинаковости снимков и не вполне точная их ориентировка на стереокомпараторе приводят к возникновению добавочных стереоскопических эффектов. Разница в масштабах снимков создает впечат-

ление поворота плоскости звездного неба вокруг оси, лежащей в этой плоскости перпендикулярно стереоскопическому базису, и таким образом, что если масштаб правой плоскости оказывается меньшим, то правый край будет казаться ближе к наблюдателю, и наоборот. Неточность ориентировки пластинок дает поворот плоскости звездного фона вокруг оси, совпадающей с направлением базиса. Различие диаметра звездных изображений создает впечатление о форме наблюдаемых звездных изображений в виде дисков, повернутых к общей плоскости звездного фона, причем если пластинка с меньшим диаметром стоит направо, то правый край диска будет казаться ближе, чем левый.

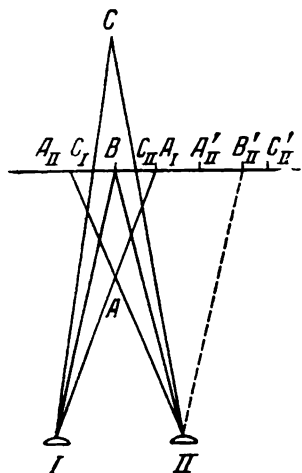


Рис. 165. Схема наблюдения трех точек стереограммы на компараторе

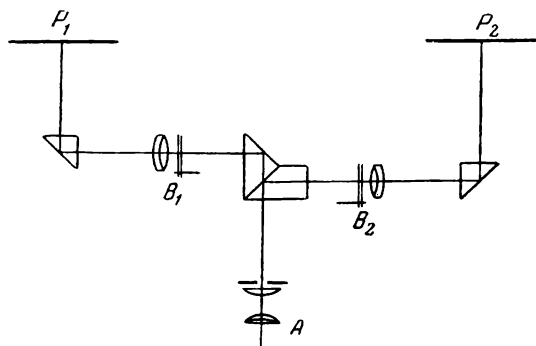


Рис. 166. Ход лучей в блинкомпараторе

Измерение параллаксов производится с помощью измерительной марки, помещаемой для этого в фокальной плоскости окуляров. Такая марка, бинокулярно наблюдаемая, представляется стереоскопически плавающей на звездном фоне. Если одну из марок в фокальной плоскости, например правого окуляра, сделать подвижной, передвигаемой микрометрическим винтом, то, перемещая подвижную марку, т. е. меняя расстояние между марками, можно изменять видимую глубину расположения марки. Практически вместо перемещения марки в большинстве современных конструкций прибора перемещают один из снимков, совмещая наблюдаемый объект с пространственным расположением марки.

Для измерения параллаксов марка сначала устанавливается на уровне звездного фона, т. е. в бесконечности, а затем — на уровне исследуемого объекта. По разности горизонтального перемещения марки в первом и во втором случаях определяется параллакс данной точки как величина смещения исследуемого объекта относительно звездного фона в направлении стереоскопического базиса. Стереокомпаратор позволяет отсчитывать смещения соответственных изображений, т. е. линейные параллаксы с точностью до 0,05 мм. Эти отсчеты производятся по шкалам с делениями, которыми снабжены микрометрические винты, перемещающие каретку и держатель, несущий правую пластинку. Стереокомпаратор позволяет сравнительно легко выполнять общий обзор пластинок. Вследствие этого он очень удобен для открытия новых звезд, быстро движущихся объектов, какими являются малые планеты и кометы, а также для обнаружения звезд с большими собственными движениями или параллаксами.

Некоторым видоизменением стереокомпаратора является б л и н к - к о м п а р а т о р. Этот прибор предназначен специально для измерения парных астрономических снимков, по существу имеет ту же конструкцию, за исключением только окулярной головки. На приборе вместо одновременного бинокулярного рассматривания обоих снимков стереограммы производится монокулярное рассматривание попеременно то правого, то левого изображений. Для этого лучи от правого и левого изображений направляются к одному окуляру, как это показано на схеме, изображенной на рис. 166. Для поочередного рассматривания пластинок P_1 и P_2 в приборе имеются перекидывающиеся заслонки (B_1 и B_2), которые закрывают лучи то от одной, то от другой пластинки.

При наблюдении в этом приборе парных стереоскопических снимков объекта, положение которого не совпадает с совмещенным фоном, объект представляется прыгающим, движущимся относительно общего неподвижного фона звезд. Расстояние между положениями звезд на парных пластинках измеряется на блинккомпараторе окулярным микрометром путем поочередного наведения на изображение сначала одной, а затем другой пластинки.

Для измерения стереоскопических параллаксов на парных астрономических снимках иногда могут применяться и другие стереоскопические измерительные приборы, которые нами будут описаны далее.

§ 5. ПРИМЕНЕНИЕ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ РАССМАТРИВАНИЯ МЕЛКИХ И МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В то время как при наблюдении очень удаленных от нас предметов для получения заметного впечатления о рельефе и пространственной глубине нам приходится применять бинокулярные оптические устройства, обладающие значительной удельной пластикой, при рассматривании малых предметов необходимо пользоваться оптическими устройствами, имеющими небольшую величину удельной пластики. Это объясняется тем, что как в первом случае большая удельная пластика при узком поле зрения, так и во втором — малая удельная пластика при широком поле зрения приводят рассматриваемое нами предметное пространство к масштабному соответствию с картиной пространства, наблюдаемого непосредственно глазами.

Действительно, рассматривая мелкие предметы в микроскоп, мы получаем изображения их на расстоянии наилучшего видения, т. е. на расстоянии около 250 мм от глаз, причем эти предметы нам представляются увеличенными в сотни раз. Увеличение угла зрения соответствует, как мы знаем, увеличению полной пластики наблюдаемого изображения, а, следовательно, это равносильно такому же увеличению базиса между точками наблюдения. Вполне понятно, что если мы будем рассматривать так близко расположенный к нам предмет с базисом, превышающим нормальное межзрачковое расстояние в сотни раз, то мы увидим каждым глазом лишь правую и левую боковые стороны рассматриваемого предмета, которые не поддадутся психофизиологическому синтезу в общий пространственный образ. Для получения естественного впечатления о пространственной картине рассматриваемого предмета необходимо, чтобы угол между направлениями, с которых рассматривается предмет правым и левым глазом, был не более предельного угла конвергенции наших глаз, в естественных условиях. Так, при рассматривании предметов, удаленных от нас на расстояние наилучшего видения, угол конвергенции составляет около 15° , а при рассматривании предметов с расстояния 150 мм этот угол доходит до 24° . При рассматривании предметов с большими углами конвергенции слитного восприятия одной общей картины предмета обыч-

но уже не получают. Видимое нами изображение предмета начинает двоиться.

В бинокулярных приборах для наблюдения близких предметов с небольшим увеличением базис между точками наблюдения правого и левого изображения применяется обычно немного меньше нормального межзрачкового расстояния. При наблюдении же очень малых предметов, с большими увеличениями базис приходится уменьшить во много десятков, а иногда и в сотни раз против нормального межзрачкового расстояния.

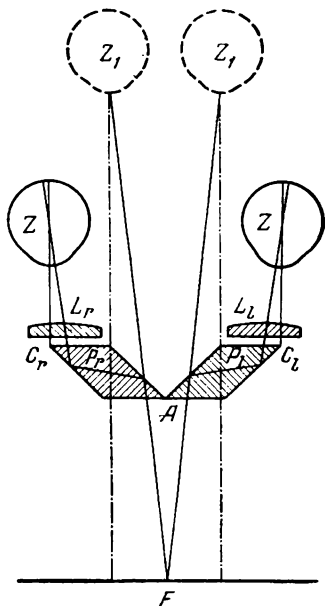


Рис. 167. Принципиальная схема стереолупы

Для рассматривания с увеличениями близких предметов применяются стереолупы. Принципиальная схема устройства стереолупы, представленная на рис. 167, показывает, что для уменьшения базиса рассматривания предмета применяются две призмы, P_r и P_l , которые уменьшают базис между точками наблюдения объекта до Z_1Z_2 вместо нормального межзрачкового расстояния ZZ . Вследствие этого уменьшается пластичность наблюдаемого изображения до величины, свободно воспринимаемой зрением.

При наблюдении более мелких предметов применяются бинокулярные микроскопы, расстояние между объективами которых уменьшено еще значительнее, чем в стереолупах. Расстояние же между окулярами обычно регулируется, чтобы сделать его равным межзрачковому расстоянию наблюдателя. Принципиальная схема типичного бинокулярного микроскопа изображена на рис. 168. Конструктивно бинокулярные микроскопы составлены из двух зрительных труб, являющихся самостоятельными микроскопами. Оптические схемы таких труб принципиально не отличаются от схемы обычного монокулярного микроскопа. Некоторые из

бинокулярных микроскопов снабжаются особыми камерами для производства микрофотографирования. Но известны и особые стереоскопические фотокамеры, предназначенные специально для съемки микроскопических препаратов. Для получения большого увеличения в этих камерах применяют проектирующую насадку, снабженную рассеивающими окулярами.

Бинокулярные микроскопы, составленные из двух труб, применяются обычно лишь для сравнительно небольших (40—50-кратных) увеличений и лишь в редких исключениях — до 300—400-кратных увеличений. При больших увеличениях для сохранения пластичности изображения, приемлемой для естественного бинокулярного наблюдения объекта, приходится размещать объективы на очень близком расстоянии один от другого. Конструктивно это выполнить очень трудно, так как приходится уменьшать диаметр отверстия действующих объективов. Значительно проще и выгоднее в этом случае воспользоваться одним объективом, разделив его зрачок пополам так, чтобы одна половина входного зрачка давала изображение предмета для одного глаза, а другая половина — для другого глаза.

Такое разделение объектива на две половинки может выполняться по различным оптическим схемам. Обычно для этих целей пользуются различного рода призмочками, присоединяемыми к объективу. На рис. 169 (а, б) показан один из применяемых в микроскопах вариантов разделения

лучей, прошедших через объектив, на два пучка, один из которых отклоняется призмой так, что он перекрещивается с первым пучком. Такое перекрещивание лучей необходимо, чтобы изображения, наблюдаемые через окуляры перевернутыми, имели правильный рельеф, т. е. чтобы правый глаз видел предназначенное ему «правое изображение», а левый глаз — «левое изображение».

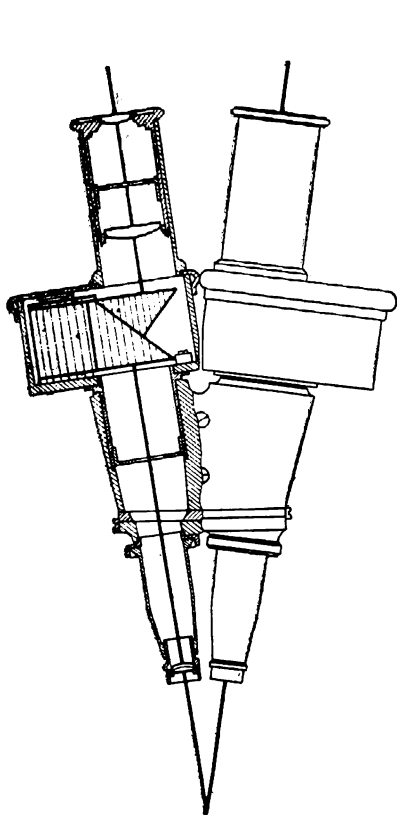


Рис. 168. Принципиальная схема бинокулярного микроскопа

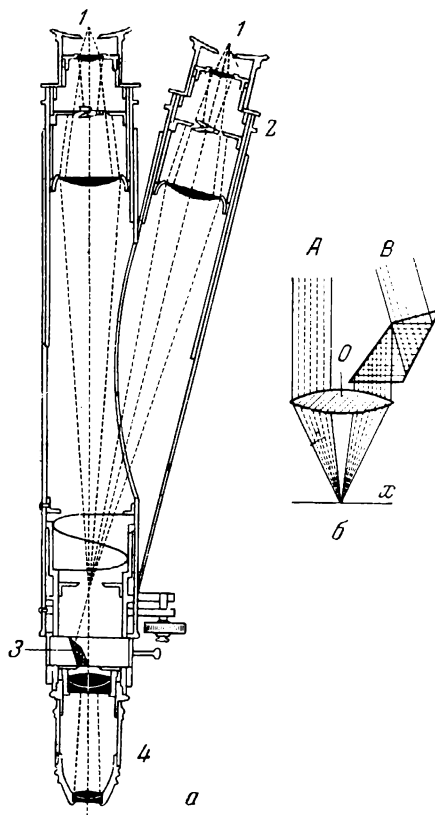


Рис. 169. Устройство микроскопа с добавочной трубкой для бинокулярного наблюдения (а) и схема действия объектива в бинокулярном микроскопе (б):

1 — окуляры; 2 — изображение; 3 — бинокулярная призма; 4 — объектив

Обе половинки объектива действуют в этом случае как самостоятельные объективы, что ясно можно видеть из схемы, воспроизведенной на рис. 169, б. Предмет X рассматривается обеими половинками объектива O с двух разных сторон так, что пучок A несет изображение одной стороны предмета X , а пучок B — изображение другой его стороны. Другая оптическая схема разделения пучка лучей, проходящего через объектив и устройство микроскопа, снабженного подобной разделительной системой, представлена на рис. 170.

Так как в последних схемах микроскопа разделение светового пучка производится почти по всему его сечению, то хорошего стереоскопического эффекта получить с помощью такого микроскопа нельзя. Некоторая иллюзия стереоскопичности изображения наблюдаемого предмета все же создается в результате частичного пространственного разделения световых пучков и неодинаковых условий освещения предмета с разных

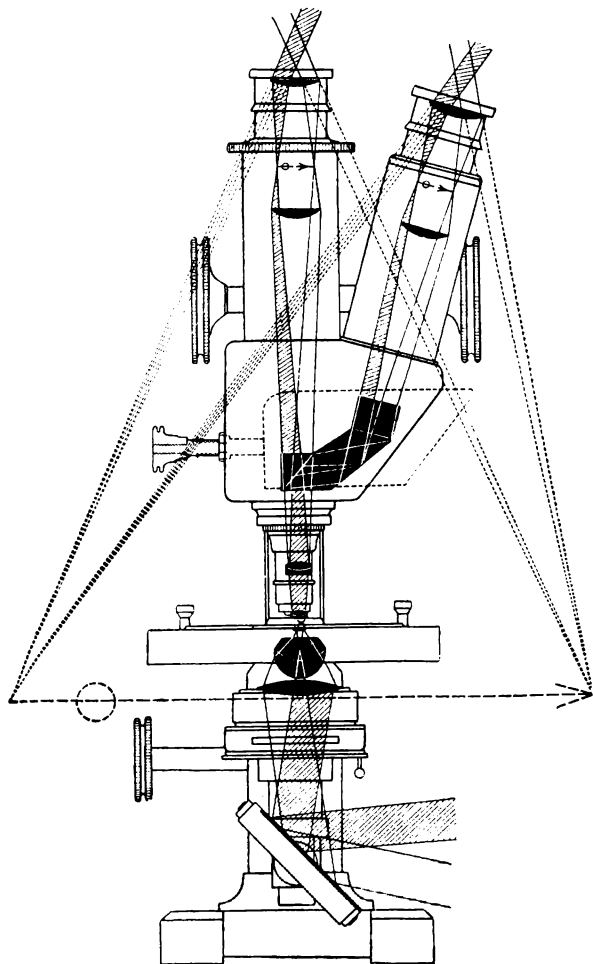


Рис. 170. Общий вид бинокулярного микроскопа с сильным увеличением и схема разделения пучка лучей, проходящих через объектив бинокулярного микроскопа

помощи обычного микроскопа, снабженного фотоприставкой. Для получения стереоскопической фотографии необходимо в этом случае сделать последовательно два снимка, делая их то одной, то другой половиной входного зрачка объектива. Для такого прикрывания зрачка объектива применяют диафрагмы, изображенные на рис. 172.

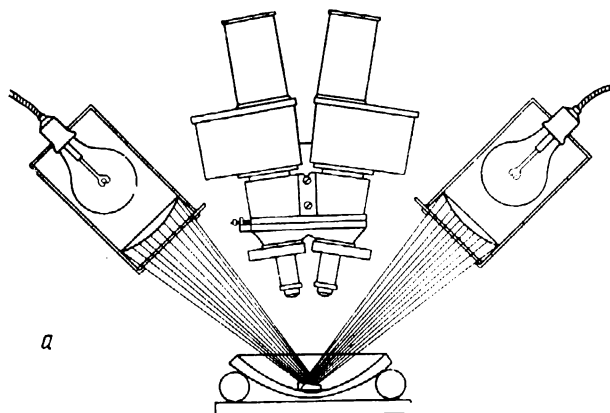
Стереоскопическое наблюдение малых предметов может производиться путем непосредственного их просцирования на экран. В этом случае может использоваться также один объектив, две половинки которого, прикрытые красным и зеленым фильтром, будут проецировать изображения, предназначенные для правого и левого глаза наблюдателя, смотрящего на экран через такие же селективные очки. Схема такой проекции представлена на рис. 173. Вместо красных и зеленых светофильтров для такой проекции можно применять поляризационные фильтры, соответствующим образом ориентированные, и таким образом осуществить поляризационную стереопроекцию малого предмета. На листе XXVIII приведена анаглифическая стереограмма макроскопического снимка коры дерева.

сторон. Соблюдая особо благоприятные условия освещения, можно получить наиболее рельефную картину наблюдаемого предмета.

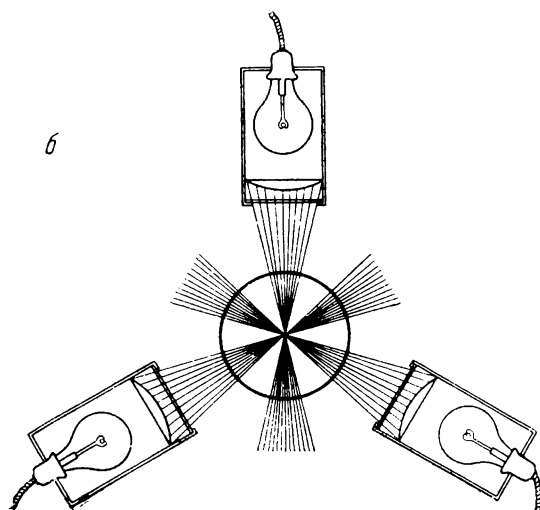
Один из методов наиболее выгоднейшего освещения при стереоскопическом наблюдении микроскопических препаратов разработал проф. М. А. Барон. Этот метод, названный микротрахископией, заключается в одновременном освещении предмета падающим и боковым проходящим светом. Наблюдение ведется через бинокулярный микроскоп. Для освещения применяется вогнутое сферическое зеркало и от одной до трех точечных электрических ламп, расположенных сбоку от установки. Общее расположение всех элементов установки показано на рис. 171, а. На рис. 171, б показана схема освещения рассматриваемого объекта. На листе XXVII приведены стереограммы микрофотографий гистологических препаратов, съемка которых выполнена по этой методике. Стереоскопическое фотографирование микроскопических препаратов с большим увеличением может выполняться и при

В последнее время для изучения микроскопического строения различных тел широкое распространение получил электронный микроскоп, обеспечивающий увеличение до нескольких миллионов крат. Малая используемая апертура электронной линзы, служащей объективом в этом микроскопе, обуславливает значительную глубину поля зрения, которая достигает величины ширины этого поля, что примерно в 500 раз превышает относительную глубину резкости светового микроскопа.

Получение стереоснимков в электронном микроскопе чаще всего осуществляется путем поворота рассматриваемого образца по отношению к оси прибора. На рис. 174, а показана



а



б

Рис. 171. Общий вид установки для стереоскопического фотографирования микроскопических препаратов по методу М. А. Барона (а) и схема освещения объекта (б)

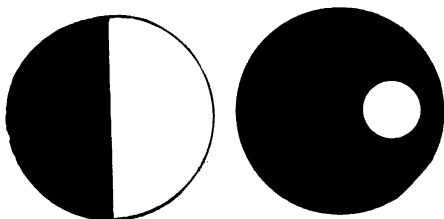
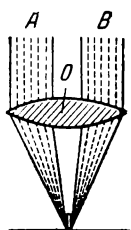


Рис. 172. Специальная диафрагма для частичного прикрывания входного зрачка объектива при выполнении стереоскопического фотографирования через обычный микроскоп путем производства двух последовательных снимков объекта

схема получения стереоизображения посредством экспонирования объекта при двух последовательных положениях оси микроскопа, образующих угол γ между собой. Этот угол конвергенции обычно выбирается в пределах $8-10^\circ$.

Вместо поворота всего прибора вокруг оси обычно поворачивают сам объект. Для придания различных наклонов образцу по отношению к оси прибора применяются специальные стереопатроны, в которых закрепляются исследуемые образцы. Один из таких стереопатронов, применяемых в микроскопе ЭМ-3, пока-

зан на рис. 174, б. При пользовании таким патроном удобно находить один и тот же участок объекта при обеих экспозициях, благодаря возможности постепенно наклонять объект и в то же время непрерывно следить за ним, удерживая исследуемый участок объекта в поле зрения.

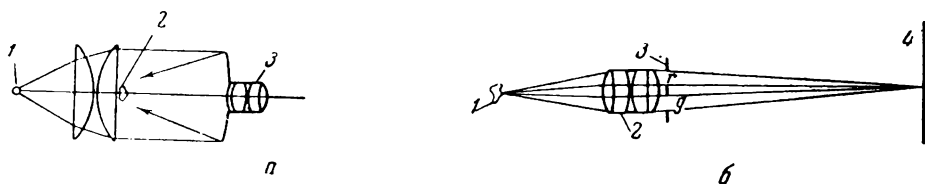


Рис. 173. Схема непосредственной стереоскопической проекции малых предметов на экран:

а — освещение объекта: 1 — источник света; 2 — предмет; 3 — объектив;
б — проекция изображения на экран: 1 — предмет; 2 — объектив; 3 — разделительные фильтры;
4 — экран

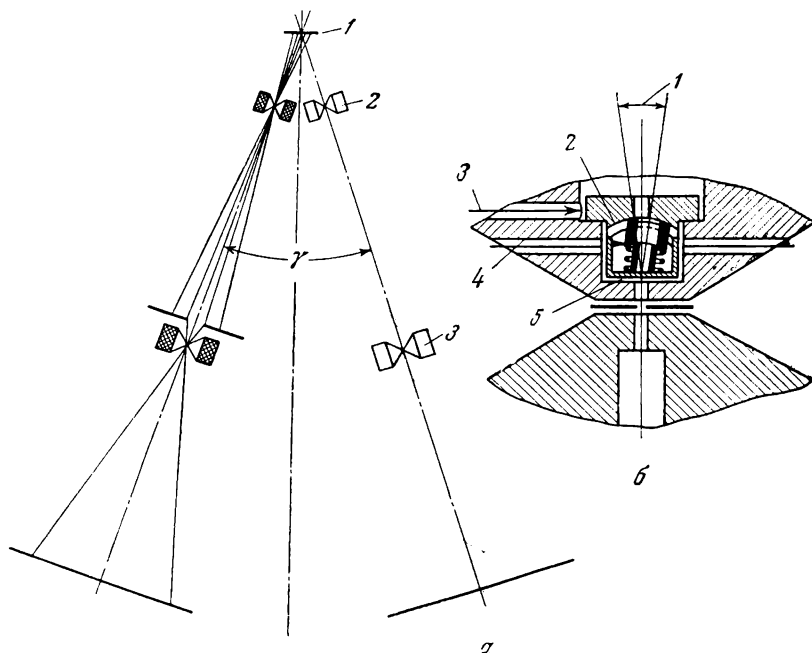


Рис. 174. Способ получения стереоизобразений в электронном микроскопе посредством поворота объекта:

а — схема проекции: 1 — объект; 2 — объектив; 3 — проекционная линза;
б — стереопатрон к электронному микроскопу ЭМ-3: 1 — угол наклона; 2 — направляющая поверхность; 3 — перемещение объекта; 4 — уравновешивающая пружина; 5 — носитель объекта

В электронном микроскопе стереоснимки можно получать поворотом на угол конвергенции не самого объекта, а осветительной системы. Так, например, в микроскопе ЭМ-100 для этого может быть использовано перемещение конденсорной линзы. Принцип действия такой схемы показан на рис. 175. Так как при этом методе используется внеосевая часть объектива, то достаточно резкие изображения можно получать только для очень малых углов конвергенции, и поэтому этот метод менее эффективен, чем метод поворота образца.

На приводимых стереограммах (лист XXIX) представлена фотография оксидной реплики, полученной с поверхности окиси алюминия при наблюдении ее в электронном микроскопе ЭМ-50 с увеличением 6000 крат.

§ 6. ПРИМЕНЕНИЕ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

Как мы уже говорили, применение стереоскопического метода наблюдения входит в практику самых различных исследований. Остановимся коротко на применении этого метода в некоторых областях медицины и биологии. Здесь мы ограничимся лишь некоторыми особенно характерными примерами, так как круг вопросов, охватываемых применением стереоскопического метода исследования, слишком обширен. Так, например, можно остановиться на применении стереоскопического метода для исследования глаз в офтальмологии. Для этого используется специальное стереоскопическое фотоустройство, схема которого изображена на рис. 176. Фотографический аппарат, выполняющий в данном случае съемку с очень близкого расстояния от глаза, должен иметь уменьшенный базис между узловыми точками правого и левого объективов. Для этого перед объективами стереоскопического фотоаппарата располагаются стеклянные призмы в виде параллелепипедов. Схема хода лучей от источника света S , освещающего глаз, показана на этом же рисунке.

Чтобы осветить внутренность фотографируемого глаза, приходится применять особое осветительное устройство, расположенное под прямым углом к оптической оси фотокамеры, так как последняя загромождает глаз для прямого освещения.

В настоящее время существуют оптические

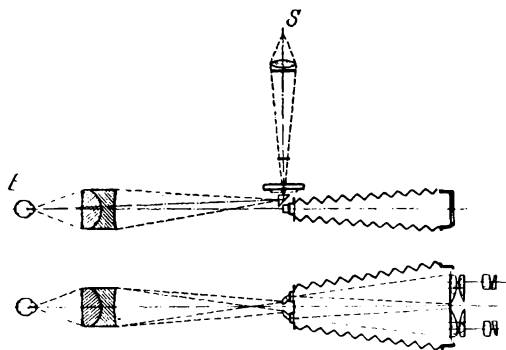


Рис. 176. Схема стереоскопического устройства для исследования глаза (E) (S — источник света)

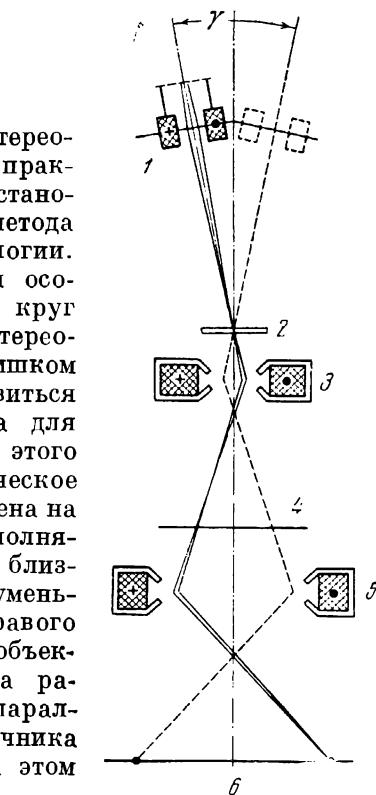


Рис. 175. Способ получения стереоизображений в электронном микроскопе путем перемещения конденсора:

1 — конденсор; 2 — объект; 3 — объектив; 4 — первая плоскость изображения; 5 — второй объектив; 6 — вторая плоскость изображения

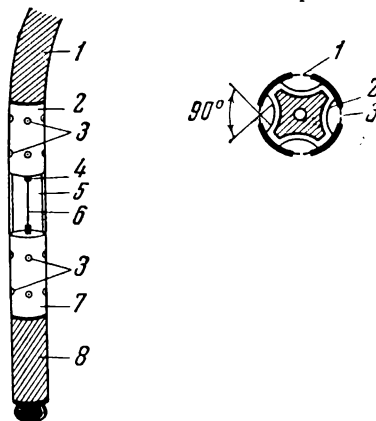


Рис. 177. Миниатюрное устройство для стереоскопического фотографирования внутренней поверхности желудка

1 — желудочная трубка; 2 — верхняя камера; 3 — отверстие; 4 — электрод; 5 — кварцевая трубка; 6 — вольфрамовая нить; 7 — нижняя камера; 8 — конец трубки. Справа показано сечение устройства 1—3 — отверстия; 2 — пленка

устройства для стереоскопического фотографирования внутренних полых органов человека; в частности, такой метод применяется для исследования внутренности желудка. На рис. 177 изображена головная часть устройства, предназначенного для такого фотографирования. Оно снабжено специальным осветительным устройством, заключенным в кварцевую трубочку, и имеет небольшие отверстия вместо линз, позволяющие фотографировать всю поверхность внутренних стенок желудка благодаря тому, что фотографирование производится с четырех сторон.

Можно не повторять того, что стереоскопический метод исследования имеет особенно большое значение при микроскопических исследованиях в медицине и биологии. Стереоскопические снимки микроскопических препаратов могут служить хорошим наглядным учебным материалом, а снимки внутреннего строения человеческого тела полезными в качестве наглядных пособий для учащихся-медиков.

§ 7. СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЕ РЕНТГЕНОИССЛЕДОВАНИЯ

Стереоскопические наблюдения можно производить не только с помощью видимого света, но также с помощью и другого рода лучей: рентгеновых, ультрафиолетовых, инфракрасных, электронных и др. В настоящее время из перечисленных выше невидимых излучений для стереоскопического наблюдения внутреннего строения предметов, широкое распространение получили рентгеновы лучи. Они широко применяются для просвечивания различных тел и предметов при решении разнообразных задач в науке, технике и медицине, а также различных инородных предметов и других дефектов в теле больного.

Стереоскопическое рассматривание рентгеновских изображений позволяет пространственно локализовать различного рода повреждения, переломы костей в теле больного, находить осколки снарядов и пуль в теле раненого и т. п. Процесс диагностики выполняется быстро и с большой точностью.

Наблюдение пространственного рентгеновского изображения в принципе может вестись как непосредственно на флюоресцирующем экране через специальные стереочки, так и путем рассматривания сфотографированных стереограмм в стереоскопе. Рентгеностереограммы обычно просматриваются в виде негативов на просвет, но в некоторых случаях с полученных рентгенограмм печатают позитивы в виде фотографий.

Фотографирование стереоскопических рентгеноизображений делает безошибочной диагностику при определении положения постороннего тела в органах больного.

Возможность наблюдения стереорентгеноизображений непосредственно на экране позволяет повысить эффективность подобного рода диагнозов.

Практически получить рентгеновские стереограммы можно даже при помощи обычной рентгеноаппаратуры. Наиболее простое решение задачи стереоскопического рентгеноанализа — метод получения стереограммы путем последовательного фотографирования одного и того же объекта с двух положений, соответствующих точкам зрения правого и левого глаза наблюдателя. Стереоскопическое рентгеновское фотографирование производят, передвигая рентгеновскую трубку в два положения, и тогда каждый получаемый рентгеноснимок представляет собой теневую проекцию с

отличным от другого, парного с ним, снимка центром проекции. Получение рентгеностереограммы на обычно применяемых рентгеноустановках производится следующим образом.

Фотографирование рентгеновского изображения производится обычным способом, т. е. непосредственным засвечиванием рентгеновыми лучами соответственно фотопластинки или пленки, для чего последние ставятся на место рентгеновского экрана. Можно производить фотографирование рентгеновского изображения и прямо с экрана при помощи обычной фотоаппаратуры. Два снимка, сделанные тем или другим способом последовательно с правого и левого изображений на экране, можно рассматривать в обычном стереоскопе.

Однако наиболее интересно для практических целей, очевидно, стереоскопическое рассматривание рентгеновского изображения непосредственно на экране без предварительного фотографирования этого изображения.

Непосредственное рассматривание стереоскопических изображений на рентгеновском экране. Для непосредственного рассматривания стереоскопического изображения на рентгеновском экране можно воспользоваться одновременной проекцией двух рентгеновских изображений объекта на два экрана, расположенных рядом, по освещаемых лучами от двух рентгеновских трубок, отстоящих друг от друга на некотором расстоянии. Для рассматривания этих двух сопряженных изображений рентгеновской стереограммы, полученной на разных экранах, может служить зеркальный стереоскоп.

Однако при небольшом расстоянии между рентгеновскими трубками, обычно составляющим нормальный стереобазис, очень трудно получить раздельную проекцию сопряженных изображений стереограммы на двух рядом стоящих экранах. Для этого требуется значительно удалить экраны от исследуемого объекта, что уменьшает четкость изображения и его яркость. Поэтому более удачное решение такого наблюдения — это применение эклипсной рентгеновской стереопроекции на один общий экран. В этом случае флюоресцирующий рентгеновский экран облучается попеременно то лучами от одной (правой), то от другой (левой) трубки, а наблюдатель снабжается эклипсными очками с заслонками в окошках, закрывающими синхронно с проекцией поле зрения то левого, то правого глаза. На рис. 178 изображены такие эклипсные стереоочки для наблюдения рентгеновских изображений. Облучение исследуемого объекта производится двумя рентгеновскими трубками, поток лучей от которых попеременно перекрывается свинцовым obtюратором. Наблюдение стереоскопического рентгеноизображения происходит на обычном флюоресцирующем экране. В очках, применяемых для наблюдения, поле зрения правого и левого глаза обычно перекрывается подвижным диском, работающим синхронно-синфазно со свинцовым диском obtюратора, перекрывающим поток рентгеновых лучей от трубок. Синхронизация движения обоих дисков электрическая. Вместо вращающегося obtюратора в очках могут колебаться легкие пластинки, приводимые в движение электромагнитами, как было показано на рис. 64.

Помещая перед экраном стереофотоаппарат и надевая на его объективы эклипсное устройство, можно сделать одновременный снимок обоих

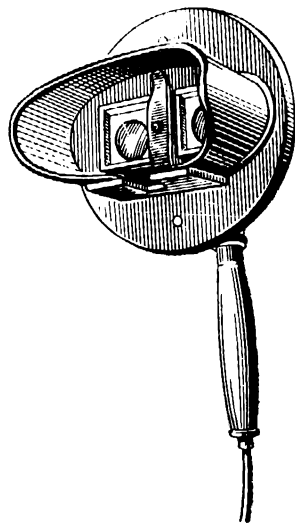


Рис. 178. Эклипсные стереоскопические очки для наблюдения рентгеновского изображения на экране

изображений рентгеновской стереограммы. Проведение такой съемки имеет смысл при стереоскопическом наблюдении за движущимися в теле включениями или когда нет возможности произвести последовательно рентгенофотографирование объекта с двух разных позиций. Наблюдение рентгеновского стереоизображения непосредственно на экране в принципе возможно и безочковым методом, если перед экраном как со стороны трубок, так и со стороны наблюдателя установить специальные растры. Неудобство этого метода — необходимость выбирать для наблюдения стереоэффекта определенные позиции. При практическом осуществлении

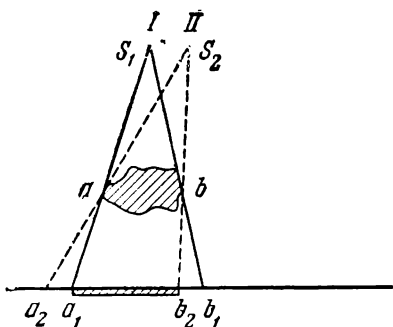


Рис. 179. Рабочее поле рентгеновского экрана при стереофотографировании

метода возникают трудности, связанные с выполнением достаточно мелкого свинцового раstra. Хотя возможно применять и крупный растр, но в этом случае для получения достаточной четкости изображения надо обоим растрам сообщить колебательное движение, что представляет ряд конструктивных и чисто технических трудностей. Анализ видимого на рентгеновском экране стереоскопического изображения дает ряд зависимостей, при помощи которых можно точно определить пространственное положение и истинные размеры исследуемых объектов.

Измерения пространственных соотношений по рентгеновским стереоснимкам могут производиться различными методами.

Для анализа стереоскопического изображения, получаемого на обычных рентгеноустановках, возможен непосредственный просмотр рентгенонегативов в стереоскопе. При этом желательно применять зеркальный стереоскоп, снабженный измерительной шкалой, и пользоваться номограммой, дающей непосредственные отсчеты размеров объекта. В качестве примера можно привести примененную автором методику получения рентгеновских снимков на походной рентгеновской установке блочного типа. В этом случае для получения двух рентгеновских снимков производилась последовательная съемка объекта из двух положений блока. Блок передвигался с таким расчетом, чтобы при его сдвиге на 60—65 мм объект, будучи неподвижным, все же экспонировался при обоих положениях блока I и II на «рабочей» части экрана (рис. 179). Рентгеновский снимок получается обычно путем прикладывания кассеты с рентгеновской пленкой или пластинкой непосредственно к экрану.

Получать рентгеновские стереоснимки можно непосредственным фотографированием изображения с рентгеновского экрана. Этот способ фотографирования называется стереоскопической флюорографией. Стереоскопическая флюорография применима не только для наблюдений посторонних включений в тело, но и при различного рода других рентгеноскопических исследованиях. Очень наглядны, например, стереоскопические снимки кровеносной системы, выполняемые при помощи рентгеновского фотографирования после введения в нее контрастирующих веществ, не вредных для здоровья больного и в то же время дающих тени на рентгеновском флюоресцирующем экране. Вполне понятно, что два снимка одного и того же объекта, полученные при освещении его сдвинутыми рентгеновскими трубками или при двух поворотах исследуемого объекта, дают стереоскопическую флюорографию. Один из стереоскопических снимков, полученных таким образом, приведен на листе XXX.

Рентгеновские стереоснимки, полученные обычным способом, могут с успехом наблюдаться при помощи зеркального стереоскопа, позволяю-

щего рассматривать большие изображения стереограммы. Одна из конструкций такого стереоскопа для анализа рентгеностереограмм, изображена на рис. 180. Этот стереоскоп может быть использован как для обычных стереоснимков, так и для непосредственного рассматривания рентгеновских негативов на просвет.

В данной конструкции стереоскопа имеется устройство, позволяющее точно определять положение исследуемого рентгенограммой объекта в пространстве. Так как этот стереоскоп не имеет линз, то увеличение, даваемое им, равно единице. Для получения неискаженных простран-

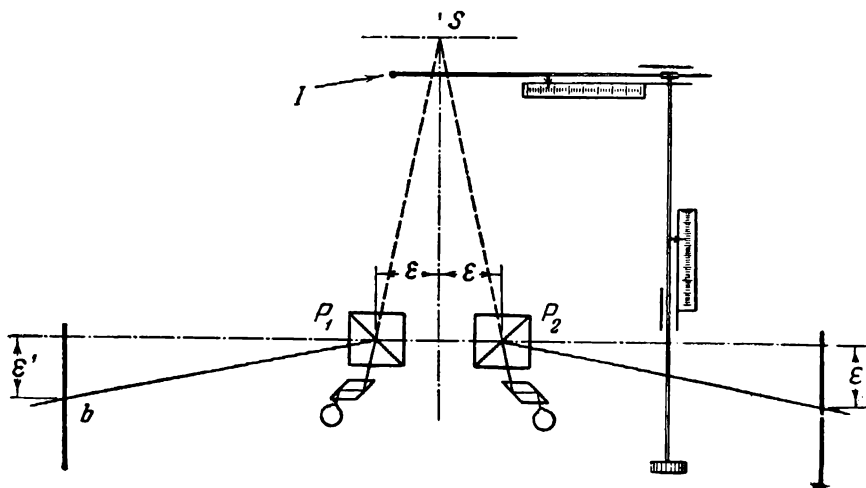


Рис. 180. Конструкция зеркального стереоскопа, предназначенного для пространственного обмера рентгеностереограмм

ственно-стереоскопических изображений при помощи этого стереоскопа необходимо при съемке строго соблюдать точное соответствие сдвига рентгеновских трубок по отношению к расстоянию при рассматривании стереоизображения.

В стереоскопе вместо обычных зеркал применены два стеклянных кубика P_1 и P_2 . Каждый из них составлен из двух призм с углами в 45 и 90°, склеенных вместе по гипотенузной поверхности, которая посеребрена с таким расчетом, чтобы получалось одинаковое количество пропускаемого и отраженного света. Рентгеновские пленки a и b располагаются так, что расстояние от глаз до плоскости пленок равно нормальному расстоянию рассматривания. Рентгеновские снимки выполняются при сдвиге трубки, равном нормальному межзрачковому расстоянию. Поэтому и наблюдаемое стереоскопическое изображение кажется лежащим в пространстве за прибором на нормальном расстоянии рассматривания от глаз наблюдателя при увеличении, равном единице. Ярко освещенная указательная марка I может передвигаться в пространстве изображения посредством механизма, схематически показанного на чертеже и приводимого в действие наблюдателем. Этот механизм снабжен шкалами, показывающими перемещение марки по трем координатам, так что движения марки можно контролировать и измерять. Наблюдатель вследствие частичного прохождения света через кубики P_1 и P_2 видит движение индексной марки в трехмерном пространстве стереоизображения. Помещая этот индекс на различных точках изображения и определяя разницу показаний на шкалах, можно точно определить расстояние между этими точками.

Чтобы обеспечить расположение пленок в стереоскопе, необходимое для выполнения измерений, на тело пациента перед съемкой помещают три маленьких предмета, непрозрачных для рентгеновых лучей, причем эти предметы помещают на известном расстоянии друг от друга. Положение просматриваемых в стереоскопе пленок регулируется по наблюдению за пространственной удаленностью этих трех предметов до тех пор, пока показания на шкале прибора для удаленности этих точек не будут равны заранее известным расстояниям между ними. Две ромбические призмы, находящиеся около глаз, дают возможность выполнить регулировку базиса приборов в случае различного межзрачкового расстояния у разных наблюдателей; эта регулировка выполняется без изменения точки зрения, и таким образом доводятся до минимума ошибки, вызываемые различием межзрачкового расстояния.

Проекция стереоскопических рентгеновских изображений поляризованным светом. Полученные в результате съемки два сопряженных рентгеновских изображения, составляющие стереограмму, могут быть спроецированы поляризованным светом на металлизированный отражающий экран или на просвечивающий экран, не деполаризирующий свет. При такого рода проекции стереоскопическое наблюдение рентгеновского снимка становится доступным одновременно группе лиц. Проекция каждого изображения ведется отдельным проекционным фонарем. При этом на объектив каждого аппарата надевается поляризационный фильтр: на один с вертикальной ориентировкой плоскости поляризации, на другой — с горизонтальной.

Для наблюдения стереоскопического изображения каждый из наблюдателей надевает очки с поляризационными фильтрами, которые ориентированы соответствующим образом: у одного глаза с вертикальным направлением плоскости поляризации, у другого с горизонтальным, таким образом, чтобы правый глаз каждого наблюдателя видел изображение правого рентгеновского снимка, а левый глаз — изображение левого снимка. Наблюдение ведется с расстояния нормального видения.

Другие применения стереорентгеноскопии. Стереоскопический метод рентгеновских исследований не ограничивается применением только в медицине. Этот метод может быть полезен и в ряде областей техники, например при исследовании внутренних раковин в металлических отливках и т. п. Стереоскопический метод исследования может быть применен и для наблюдения за радиоактивными индикаторами, за продвижением так называемых меченых частиц радиоактивных и тяжелых изотопов, и в других подобных случаях.

§ 8. СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ

При рассматривании в стереоскопе двух одинаковых изображений, не различающихся пространственным параллаксом, мы видим общую плоскую картину. Однако если некоторые детали на этих изображениях не вполне идентичны, то они начинают казаться нам выступающими вперед или уходящими вглубь от плоскости наблюдаемой картины. Несоответствие в освещенности изображений, видимых правым и левым глазом, в некоторых случаях также может привести к получению кажущегося рельефа на стереоскопически синтезируемом плоском изображении. Эффект такого рода стереоскопической иллюзии используется иногда для решения некоторых технических задач. Помещая в стереоскопе два одинаковых изображения, можно заметить, напечатаны ли они с одного и того же клише или с разных, и таким образом обнаружить подделку подлинных документов. Если на одном документе сдвинута хоть одна буква или один штрих по сравнению с расположением этой буквы или штриха на другом документе, эта буква или штрих представляются в стереоскопе отде-

лившимися от плоскости документа и «плавающими» впереди или позади остальных букв или знаков. Таким путем, сличая копии машинописного текста, удастся узнать, напечатаны ли они одновременно на машинке или нет. Можно выяснить, напечатан ли типографский текст с одной матрицы или с разных, и таким образом установить подлинность исторических документов, отличить подлинники от фальсификации. Этот метод применяется для обнаружения подделок ценных банковских документов и др. Распространенное мнение о пригодности этого метода для обнаружения фальшивых денежных знаков неверно, так как по условиям современной печати даже два подлинных денежных знака при рассматривании в стереоскопе могут давать впечатление рельефа их рисунка.

Очень интересно, что путем сравнения в стереоскопе можно обнаружить подлинность и идентичность не только плоских изображений, но и рельефных. Так, при помощи стереоскопа можно установить, произведена ли чеканка сравниваемых медалей посредством одной и той же матрицы или нет. Стереоскопический метод может быть применим для обнаружения малейших неточностей в изготовленной какой-либо ответственной механической детали при сравнении ее в стереоскопе с образцом.

Одну интересную возможность таит стереоскопический метод сравнения двух не совсем одинаковых портретов одного и того же лица. Оказывается, что если имеется два не совсем одинаковых портрета, то путем рассматривания в стереоскопе можно обнаружить рельефный образ этого лица. В том случае, если сравниваемые портреты будут принадлежать разным лицам, стереоскопическая картина это несоответствие выявит. Конечно, прежде чем сравнивать такие портреты, они должны быть приведены к общему масштабному соответствию. Такого рода сравнения позволяют устанавливать и разгадывать в некоторых случаях подлинные имена исторических лиц, изображения которых обнаруживают на старинных картинах, и в других случаях.

Стереоскопический иллюзорный эффект возникает при рассматривании движущегося предмета, кажущегося правому и левому глазу наблюдателя не одинаково освещенным.

На явлении возникновения стереоскопического эффекта при наблюдении движущегося предмета при равномерно освещенном фоне и при неодинаковой яркости изображений, видимых правым и левым глазом, основан особый метод фотометрирования, предложенный в свое время Пульфрихом. Принцип этого метода может быть представлен схематично в таком виде. Наблюдатель смотрит двумя глазами на иглу, движущуюся в плоскости равномерно освещенного экрана. Перед каждым глазом наблюдателя находится какая-либо поглощающая свет среда в виде нейтрального серого цвета светофильтра. Глаз наблюдателя в это время фиксирует определенную точку экрана. Если поглощение света в одной среде, стоящей перед одним глазом, неодинаково с поглощением света в другой среде, стоящей перед другим глазом, то возникает стереоскопическая иллюзия, создающая впечатление движения иглы вокруг точки — то к нам, то от нас. Если же яркость света для обоих глаз одинакова, такого стереоскопического эффекта не наблюдается. При фотометрировании, т. е. при определении оптических плотностей какой-либо жидкой или твердой поглощающей свет среды, эта среда помещается перед одним глазом наблюдателя, а перед другим глазом — заранее известный по плотности нейтральный светофильтр. Меняя светофильтры, можно подобрать светофильтр с плотностью, соответствующей оптической плотности исследуемой среды. Равенства плотностей по данному методу фотометрирования устанавливаются соответственно стереоскопическому впечатлению иллюзорного движения иглы.

Глава VII

ПРИМЕНЕНИЕ СТЕРЕОСКОПИИ В ТЕХНИКЕ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И КАРТОГРАФИРОВАНИЯ

§ 1. Стереоскопические методы измерения расстояний. § 2. Основные типы стереодальномеров. § 3. Стереодальномеры высокой точности. § 4. Стереоскопическая аэрофотосъемка. § 5. Методы стереофотограмметрии. § 6. Приборы для стереофотограмметрических измерений. § 7. Инженерная стереофотограмметрическая съемка. § 8. Простейшие методы стереоскопических измерений. § 9. Особенности зрительной дешифровки стереоскопической картины.

§ 1. СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЙ

Наблюдая удаленные объекты при помощи бинокулярных зрительных приборов — призмённых биноклей, стереотруб, можно получить достаточно ясное представление об относительном расположении различных объектов в поле зрения. Чем больше величина полной пластики такого зрительного прибора, тем отчетливее видна картина взаимного расположения наблюдаемых объектов. Однако по видимой пространственной картине можно судить лишь об относительном удалении объектов, находящихся в поле зрения. Наиболее простой способ приблизительной оценки расстояния от наблюдателя до рассматриваемого объекта — измерение углового размера этого объекта при помощи сетки, помещенной перед окуляром прибора и наблюдаемой на фоне изображения. Зная цену деления такой сетки в угловой мере и примерную величину рассматриваемого объекта, можно вычислить приближенно удаленность объекта.

Этот простой метод определения удаленности видимых объектов не всегда оправдывает себя и не может обеспечить большой точности в оценке расстояния. Человек не в состоянии глазомерно определить расстояние до незнакомого или малоизвестного ему объекта, если в поле зрения отсутствуют какие-либо хорошо известные пространственные ориентиры, в незнакомой обстановке часто заблуждается относительно действительных удаленностей видимых им объектов.

Чтобы представить, какие в этом отношении возможны ошибки, приведем здесь случай, описанный участником Новоземельской экспедиции Е. Зингером¹:

«Однажды, находясь на станции Ледораздельная, мы ждали трактор с главной базы экспедиции вот уже несколько дней. Глаза проглядели в томительном ожидании. И вдруг одновременно мы с Корякиным отчетливо увидели в снежной пустыне черпую точку. Мы долго рассматривали ее и были немало удивлены тем, что она куда-то не двигалась. Мы решили, что трактор, очевидно, остановился, и сами пошли к нему навстречу.

Каково же было наше огорчение, когда вместо трактора мы обнаружили в десятке метров от себя, в снежных застругах, обычную спичеч-

¹ Е. З и н г е р. На ледниках Новой Земли, «Вечерняя Москва», 1959, декабрь.

ную коробку фабрики «Красная звезда» с этикеткой «Собирайте лом черных металлов». . . Так вот что приняли мы за трактор! Вот как обманул нас полярный мираж!»

Подобные обманы зрения объясняются крайней бесцветностью снега, а также отсутствием теней, красок, контрастов. Однако при пользовании бинокулярным зрительным прибором в принципе имеется полная возможность определять истинные расстояния до наблюдаемых объектов. Возможность измерения действительных расстояний основывается на определении величины угловых параллаксов рассматриваемых объектов при помощи применения в бинокулярных зрительных приборах особых стереоскопических шкал. Зрительные приборы, снабженные такими шкалами, получили название стереодальномеров.

Принцип измерения расстояний до наблюдаемого объекта при помощи стереодальномера заключается в следующем. Искомая дистанция до объекта (рис. 181) определяется из геометрических соотношений в треугольнике ABC , т. е.

$$D_x = \frac{b}{\operatorname{tg} \alpha_0 + \operatorname{tg} \alpha_1},$$

где b — базис прибора; α_0 и α_1 — углы визирования объекта. Так как углы α_0 и α_1 всегда малы, то можно считать

$$D_x = \frac{b}{\alpha}.$$

Здесь α — параллактический угол, соответствующий удалению объекта.

Для определения D_x необходимо знать b и α . Угол α практически может быть определен как сумма двух углов α_0 и α_1 . В большинстве дальномеров величина базиса известна и постоянна, а величина угла α и сама дистанция D_x определяются по шкалам прибора автоматически без вычислений.

Принципиальная схема стереодальномера изображена на рис. 182. Базисом прибора является расстояние между осями объективов B , которое для увеличения пластики прибора сделано значительно больше расстояния между окулярами b . Если развернуть для наглядности трубы дальномера (рис. 183), так чтобы трубы 1 и 2 были направлены на бесконечно удаленный предмет, изображения которого объективами O_1 и O_2 рисуются в центре перекрещивания сеток C_1 и C_2 , соответственно перед левым и правым окулярами прибора, то при рассмотрении предмета A , находящегося на конечном расстоянии D_x , вдоль оси AO , окажется, что одно из изображений предмета A'_1 будет совпадать с крестом левой сетки C'_1 , а другое изображение A'_2 будет смещено относительно креста сетки C'_2 на величину Δ . Совместив изображение A'_2 с крестом сетки C'_2 , получим

$$\frac{D_x}{b} = \frac{f'}{\Delta},$$

откуда

$$D_x = \frac{bf'}{\Delta},$$

где f' — фокусное расстояние объектива, Δ — величина смещения изображения (линейный параллакс), которая может быть измерена, а отношение $\frac{\Delta}{f'} = \alpha$, т. е. равно измеряемому параллактическому углу. В стереоскопических дальномерах весь процесс определения параллактического угла и самой дистанции происходит автоматически благодаря

естественной способности бинокулярного зрения воспринимать стереоскопический эффект.

Наблюдая в окуляры изображения объектов, полученные вблизи фокальной плоскости объективов, мы видим картину рассматриваемого пространства в виде стереоскопической модели. Каждая пара изображений

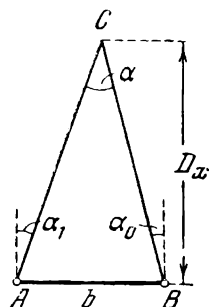


Рис. 181. Стереоскопический принцип измерения расстояния до наблюдаемого объекта

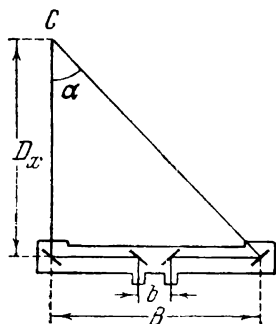


Рис. 182. Принципиальная схема стереодальномера

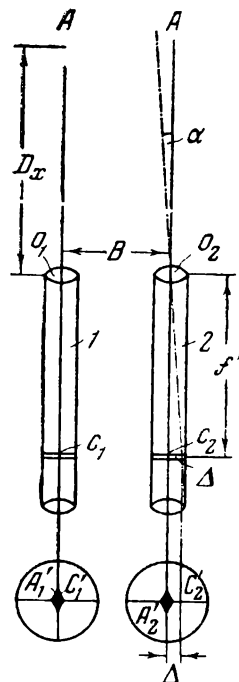


Рис. 183. Развертка схемы стереоскопического дальномера

одного из объектов, видимая правым и левым глазом, воспринимается нами как изображение одного предмета, удаленного от наших глаз на расстояние

$$D = \frac{b_0}{\Delta} f_2,$$

где f_2 — фокусное расстояние окуляров, b_0 — межзрачковое расстояние у наблюдателя.

Таким образом, все предметное пространство мы наблюдаем в виде пространства изображений, которое рассматриваем с более близкого расстояния, вследствие чего легче заметить различие в расположении наблюдаемых предметов по глубине. Это различие в расположении предметов заметно не только по отношению друг к другу, но также и по отношению к сеткам нитей, совмещенных с изображениями перед каждым окуляром. Поместив в поле зрения дальномера искусственные марки, видимые в пространстве изображений как особые предметы, удаленные на разные, соответственно определенные расстояния, можно оценивать удаленность наблюдаемого предмета по отношению к той или иной марке.

§ 2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ СТЕРЕОДАЛЬНОМЕРОВ

В зависимости от устройства измерительных марок различают два основных типа стереодальномеров: в одном применяются марки в виде неподвижной измерительной сетки, в другом — подвижные измерительные марки. В обоих случаях марки выполняются в виде сеток, устанавливаемых в фокальных плоскостях окуляров прибора.

Стереодальномер с неподвижной шкалой. Этот прибор конструктивно мало чем отличается от простой бикулярной стереотрубы. Собственно, любая стереотруба может быть превращена в такой стереодальномер,

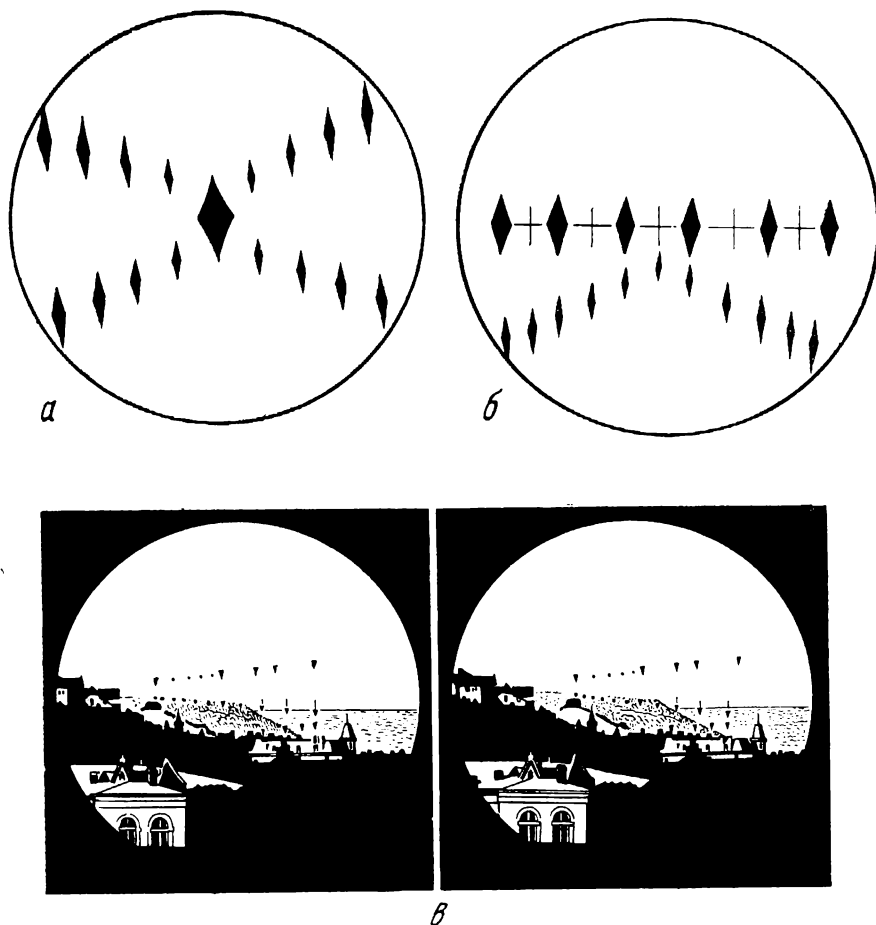


Рис. 184. Вид сетки со стереоскопическими измерительными марками

если в фокальных плоскостях обоих окуляров стереотрубы установить сетки в виде стереоскопического рисунка марок, при бикулярном наблюдении которых возникает в поле зрения пространственная картина как бы «висящих в воздухе» отдельных марок, находящихся на разных расстояниях от наблюдателя. Обычно эти измерительные сетки представляют собой стеклянные пластинки, а марки на них имеют форму ромбов (рис. 184, а, б), или треугольников (рис. 184, в) и располагаются зигзагообразно. Каждая марка соответствует вполне определенному удалению, например, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300 м и т. д.

При рассматривании в стереотрубу удаленных предметов наблюдатель видит изображения на фоне пространственно расположенных марок. Наб-

любая какой-либо предмет на фоне этих марок, можно заметить, что та или другая вполне определенная марка окажется совмещенной по глубине с рассматриваемым предметом. Все остальные марки ввиду стереоскопического эффекта будут казаться расположенными ближе или дальше рассматриваемого предмета. Если известно, какому удалению соответствует данная совмещающаяся с предметом марка, то имеется возможность установить расстояние до наблюдаемого предмета. При расположении

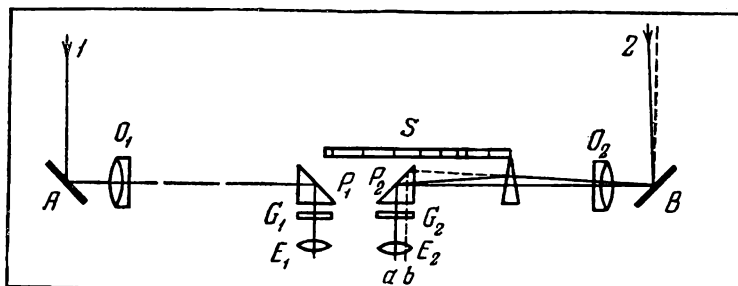


Рис. 185. Оптическая схема стереоскопического дальномера с подвижной маркой

предмета между двумя марками оценка части промежуточной дистанции производится на глаз. Обычно над марками подписываются цифры, указывающие удаления соответственно в сотнях или в тысячах метров. Поле зрения, видимое в таком дальномере при рассматривании через него местности, представлено в виде стереограммы рис. 184 (в).

Изгибы шкалы делаются для того, чтобы удлинить ее и нанести чаще марки, так как это повышает точность измерения дистанции. Точность измерения также повышается при увеличении пластики прибора, для достижения чего приборы делают со значительными увеличениями и достаточно большим базисом. Глазомерная оценка расстояния между предметом и маркой не может быть точной, вследствие чего эти дальномеры не дают большой точности в измерениях. Затруднительно измерять и дистанцию до предмета, рассматриваемого на темном фоне, вследствие плохой различимости в этом случае самих марок. Из-за этих недостатков дальномеры с постоянной шкалой не находят особенно широкого распространения. Более точными являются стереодальномеры с подвижной измерительной маркой.

Стереодальномер с подвижной измерительной маркой. Этот дальномер не вполне оправдывает свое название, так как в нем, по существу, движется не сама марка на фоне рассматриваемых предметов, а искусственно перемещающиеся изображения предметов относительно неподвижно расположенной в поле зрения марки или системы марок. Оптическая схема стереоскопического дальномера с подвижной маркой изображена на рис. 185. Дальномер представляет собой трубку, на концах которой имеются два окошка А и В, закрытые плоскопараллельными стеклянными пластинками. За окошками расположены призмы (P_1 и P_2). Лучи света, пройдя через окошки, попадают на эти призмы и, преломляясь в них, изменяют свое направление на 90° , идя вдоль оси трубки навстречу друг другу. На пути лучей за призмами располагаются объективы O_1 и O_2 , а далее две оборачивающие линзы E_1 и E_2 , после чего отклоненные лучи оказываются выходящими через два небольших отверстия в средней части трубы.

Перед окулярами помещены стеклянные пластинки G_1 и G_2 с марками. В плоскости этих марок объективы O_1 и O_2 рисуют прямые действительные изображения наблюдаемых объектов. На пути хода одного из пучков лучей, например правого, помещается оптический клин, представляющий призму с малым преломляющим углом. Лучи света, проходя через стеклянный клин, отклоняются вследствие преломления от своего направления к основанию клина, поэтому смещается изображение объекта в фокальной плоскости правого объектива. Чем ближе будет находиться клин к этому изображению, тем меньше будет смещение, а чем дальше от него и ближе к объективу O_2 , тем больше будет это смещение. Это легко понять из рассмотрения рис. 186, на котором показано действие клина, установленного за объективом. При вершинном угле клина α отклонение лучей от осевого происходит на угол δ , который зависит от показателя преломления стекла клина следующим образом: $\delta = (n-1)\alpha$.

Очевидно, линейное смещение луча от оси в плоскости изображения Δ будет тем больше, чем больше расстояние a клина от этой плоскости, т. е. $a\delta = \Delta = a(n-1)\alpha$.

Таким образом, передвигая оптический клин вдоль оси трубки дальномера, можно смещать одно из изображений объекта в плоскости, перпендикулярной к этой оси параллельно базису прибора. Путем перемещения клина можно достичь того, что оба изображения рассматриваемого объекта будут находиться на таком же расстоянии друг от друга, как и соответственные марки, рассматриваемые через правый и левый окуляр, и тогда наблюдаемый объект будет казаться удаленным на такое же расстояние от наблюдателя, на какое ему кажутся удаленными марки. Оптический клин перемещается путем вращения измерительного валика, соединенного с указательной шкалой дистанций. При полной компенсации параллактического сдвига, осуществляемого перемещением клина, изображения наблюдаемого объекта, рассматриваемые через окуляры, располагаются на параллельных осях и наблюдаются как бы находящимися на бесконечно большом расстоянии.

Линейное перемещение изображения в плоскости марки должно компенсировать линейный параллакс соответствующей точки изображения, т. е. оно должно составлять

$$p = \frac{bf'}{D_x},$$

где p — линейный параллакс, b — базис дальномера, f' — фокусное расстояние объективов дальномера, а D_x — удаленность наблюдаемого объекта от дальномера. Отсюда может быть вычислено расстояние до наблюдаемого предмета по величинам смещений изображения, а следовательно, легко градуирована и шкала дальномера.

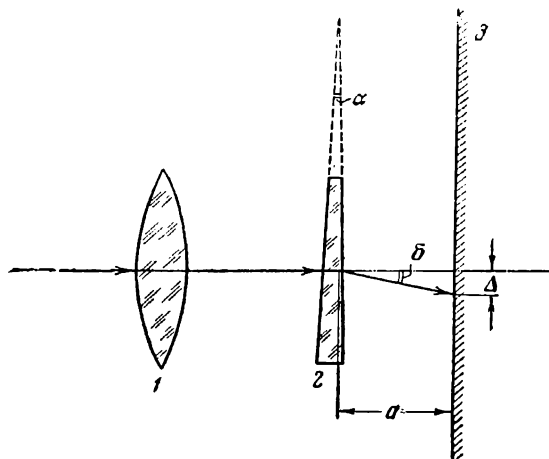


Рис. 186. Схема действия клинового компенсатора:
1 — объектив; 2 — клин; 3 — плоскость изображения

Для перемещения изображения наблюдаемого объекта в дальномерах применяется не только перемещаемый вдоль оси зрительной трубы оптический клин, но также и другие устройства, называемые оптическими компенсаторами. В частности, применяются иногда два стеклянных клина, вращаемых вокруг оси прибора в противоположные стороны, вследствие чего изменяется преломляющий угол системы, образуемой обоими клиньями. Угол изменяется от максимального, когда клинья сложены своими вершинами и основаниями, и до нуля, когда вершина одного клина сложена с основанием другого, так как оптическая система клиньев в последнем случае превращается в плоскопараллельную пластинку. Связав поворот клиньев со шкалой, градуированной в дистанциях по расчетным формулам данного компенсатора, можно отсчитать искомую дистанцию D_x по подвижной шкале против неподвижного индекса в момент сведения пространственного положения изображения наблюдаемого объекта с измерительной маркой.

Подвижные марки, применяемые в стереодальномерах, бывают двух типов. При измерении расстояний на местности, на которой любой предмет может быть объектом наблюдения, окулярные сетки имеют по одной ромбовидной марке в центре поля. Для наблюдения воздушных целей, чтобы создать большой стереоскопический эффект, кроме центральной — главной измерительной марки, на сетку наносят дополнительные марки, дающие стереоскопическое восприятие перекрестия марок (рис. 184, б), расположенного или горизонтально, или немного наклонно. При перемещении компенсатора изображение наблюдаемого объекта кажется как бы проскакивающим между марками, вследствие чего удается отчетливо заметить перемещение предмета в глубину по отдельным вспомогательным элементам этой системы марок. В последнее время употребляется система неподвижных марок в виде «заборчика», расположенного в одной плоскости, и вспомогательных марок, идущих в глубину от этого «заборчика» (рис. 184, а). Такая система марок позволяет измерять расстояние до предметов, без необходимости точной горизонтальной наводки дальномера на предмет, что облегчает измерение расстояния до движущихся целей. В этом случае любая главная марка забора может являться измерительной.

Преимущество стереодальномера с подвижной измерительной маркой состоит в большей точности определения дистанции, осуществимой вследствие того, что подведение изображения предмета под одну из марок шкалы и точное ее совмещение по глубине с этой маркой позволяет отсчитать дистанцию более точно, чем это приходится делать при наблюдении предметов в стереодальномере с неподвижной шкалой марок. Интересно заметить, что при работе оптического компенсатора, сдвигающего одно из изображений наблюдаемого объекта относительно неподвижной марки, наблюдателю кажется, что рассматриваемое им изображение неподвижно, а движется в глубину измерительная марка. Эта стереоскопическая иллюзия, зависящая исключительно от психофизиологических особенностей нашего зрения, и послужила для названия этих дальномеров стереодальномерами с «блуждающей», или подвижной, измерительной маркой. Стереодальномеры этой конструкции получили широкое применение. В стереодальномерах этого типа концевые призмы иногда заменяют зеркальными отражателями, составленными из двух зеркал наружного серебрения. Окуляры в некоторых стереодальномерах поворачиваются вверх на $60-80^\circ$ для удобства наблюдения воздушных целей.

Стереоскопические дальномеры, приспособленные для измерения расстояний до воздушных целей, получили название **с т е р е о в ы с о т о м е р о в**. Действие стереовысотомера отличается от действия дальномера тем, что стереовысотомером измеряются непосредственно высота цели, а не расстояние до нее. Определение высоты цели имеет существенное зна-

чение при наблюдении самолетов, расстояние до которых меняется очень быстро, в то время как их высота изменяется сравнительно медленно; следовательно, она может быть измерена более точно, чем быстро меняющееся удаление. Принцип действия стереовысотомера может быть уяснен из рассмотрения схемы, изображенной на рис. 187. При измерении дальности по воздушным целям плоскость измерительного треугольника, заштрихованного на рисунке, наклонена под некоторым углом к горизонту. Из геометрических соотношений следует

$$H = D \sin \gamma, \quad \alpha = \frac{b}{D}, \quad \alpha_0 = \frac{b}{H}.$$

Здесь D — удаленность по прямой, H — высота полета цели, γ — угол места цели, b — базис прибора, α — параллактический угол при любом угле γ , α_0 — параллактический угол при $\gamma = 90^\circ$. Очевидно, что в тот момент, когда самолет будет находиться точно над точкой измерения, угол $\gamma = 90^\circ$, высота H равна дальности D и, следовательно, прибор будет определять высоту цели

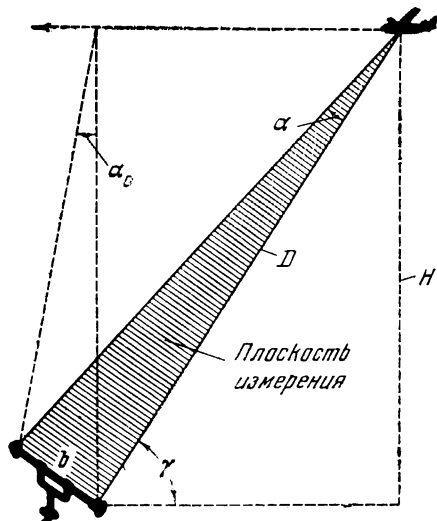


Рис. 187. Принципиальная схема действия стереоскопического высотомера

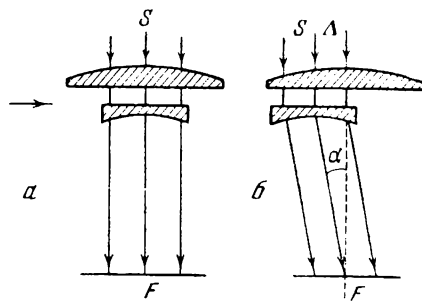


Рис. 188. Схема действия линзового компенсатора

(параллактический угол α будет иметь при этом максимальное значение, равное α_0 данной высоты полета).

Из приведенных выше формул имеем:

$$\alpha = \alpha_0 \sin \gamma,$$

т. е. при постоянной высоте полета параллактический угол изменяется пропорционально синусу угла места цели γ .

Если в конструкцию дальномера ввести механизм, который с изменением угла места цели при постоянной высоте полета будет автоматически компенсировать изменение параллактического угла пропорционально синусу угла места цели, то такой дальномер превращается в стереовысотомер. В стереовысотомерах, построенных по этому принципу, измерительные марки после совмещения их с изображением цели автоматически удерживаются на одинаковой глубине без помощи стереоскопа. При изменении же высоты полета проявляется расхождение по глубине марок и цели. Это расхождение компенсируется при помощи измерительного компенсатора, связанного со шкалой высот. Таким образом, осуществляется двустороннее управление измерительным компенсатором прибора от механизма вертикальной наводки и самостоятельного перемещения

измерительного компенсатора от руки наблюдателя. Если управление измерительным компенсатором отключить от механизма вертикальной наводки, то стереовысотомер превращается в обычный стереодальномер и шкала высот будет служить шкалой дальностей.

Дальнейшее усовершенствование конструкции стереодальномеров привело к применению в качестве оптического компенсатора афокальной системы, составленной из двух линз — положительной и отрицательной. Путем применения линзового компенсатора удается значительно упростить и конструкцию прибора. Действие линзового компенсатора пояснено на схеме, изображенной на рис. 188. Пучок параллельных лучей проходит через выпуклую положительную, а затем вогнутую отрицательную линзы, имеющие одинаковое фокусное расстояние. При точной центрировке обеих линз (рис. 188, а) лучи выходят из отрицательной линзы параллельно своему первоначальному направлению без отклонения. Если центр одной из линз сместить перпендикулярно оптической оси на величину Δ (рис. 188, б), то пучок лучей отклоняется от своего первоначального направления на угол

$$\alpha = \frac{\Delta}{f},$$

где α — угол отклонения, а f — фокусное расстояние линзы.

Стереоскопические дальномеры для измерения расстояний до удаленных предметов во многих отношениях более удобны и выгодны, чем другие системы оптических дальномеров. Во-первых, при наблюдении цели в стереодальномер благодаря работе обоих глаз не так сильно утомляется зрение, как при работе на монокулярном зрительном приборе. Во-вторых, стереодальномер дает возможность измерять расстояния до предметов, не имеющих резких очертаний. Такими предметами могут служить деревья на фоне леса, облака, дым и пр. В-третьих, стереодальномер позволяет вести измерения по быстро перемещающимся целям: самолетам, танкам, кавалеристам и др. Наконец, у стереодальномера действующим является все поле зрения и поэтому одновременно с измерением расстояний стереодальномер может служить прибором для наблюдения.

К числу недостатков стереодальномера следует отнести затруднительность точного отсчета дистанции нетренированным наблюдателем, так как точные сведения марки с изображением, а следовательно, и точный отсчет по шкале удаются только после специального обучения и тренировки глаз на специальных приборах. Для устранения недостатков субъективного восприятия пространственной глубины видимое через окуляры стереодальномера изображение может быть в некоторых случаях сфотографировано, а затем уже на полученной стереограмме могут быть измерены параллаксы для одноименных объектов, по которым можно уже более точно определить расстояние до этих предметов. Такой обмер параллакса выполняется при помощи ряда вспомогательных устройств.

В последнее время сделаны попытки создать новые стереоскопические приборы для измерения расстояний, которые дают возможность определять расстояния до наблюдаемых предметов, не только путем использования стереоскопического эффекта, но также и посредством оптического совмещения искусственно разделенных полей изображения. Такие системы стереодальномеров позволяют пользоваться ими не только обученным и тренированным наблюдателям, но даже лицам, не обладающим стереоскопическим восприятием. С другой стороны, при стереоскопическом восприятии видимой в таком дальномере картины точность измерения дистанции во много раз возрастает. К таким системам относятся дальномеры с т е р е о к о н ц и д е н ц и с т е р е о и н в е р т.

§ 3. СТЕРЕОДАЛЬНОМЕРЫ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

Точность определения дистанции при пользовании стереоскопическими дальномерами зависит от величины полной пластики прибора. Увеличение полной пластики может быть достигнуто, как мы знаем, путем увеличения базиса дальномера и углов рассматривания. Последнее имеет практические пределы ввиду того, что при больших увеличениях заметно ограничивается наблюдаемое поле, что затрудняет отыскивание цели. Для увеличения пластики прибора наиболее выгодно увеличить базис дальномера, так как при этом уменьшается значение возможной ошибки в определении дистанции, но увеличение базиса дальномера, очевидно, связано с увеличением его габаритов.

Интересен способ увеличения базиса дальномера вдвое по сравнению с его длиной. Этот способ основывается на вспомогательном использовании псевдоскопического эффекта при рассматривании цели, возникающего, когда правый глаз наблюдателя видит левое изображение, а левый глаз — правое. При этих условиях рассматривания видимая последовательность расположения предметов обратна той, которая имеется в действительности. Более близкие предметы кажутся нам более удаленными, и наоборот.

Идея увеличения чувствительности прибора сводится к тому, чтобы вместо неподвижной марки, наблюдаемой в обычном стереодальномере, ввести в поле зрения второе изображение объекта, движущееся при настройке прибора по глубине в обратном направлении по сравнению с первым изображением. Если, например, при перемещении компенсатора первое изображение приближается к наблюдателю, то второе должно в это же время удаляться от него. Очевидно, несовпадение по глубине двух изображений цели, движущейся в разных направлениях, будет вдвое больше того несовпадения, которое имеется в обычном стереодальномере между целью и неподвижной маркой. Это удвоение расстояния между совмещаемыми изображениями равноценно удвоению базиса прибора, что дает возможность получить вдвое более точные измерения.

Стереоскопические дальномеры, использующие псевдоскопический эффект, могут быть построены по двум схемам. Одним из возможных решений является разделение видимого стереоскопического пространства на две части горизонтальной линией, в верхней части поля зрения получают изображение с нормальным стереоскопическим эффектом, а в нижней части — то же изображение, но псевдоскопическое. Эта система дальномера называется «стереокоинциденц». Другим решением может быть наложение в поле зрения прибора изображения с нормальным стереоскопическим эффектом на изображение, имеющее псевдоскопический эффект. Такая система дальномера называется «стереоинверт». Обе эти системы имеют свои преимущества и недостатки. Рассмотрим их несколько подробнее.

Дальномер стереокоинциденц. Действие дальномера стереокоинциденц можно представить следующим образом. В дальномер, изображенный на рис. 189, а, попадают лучи от предмета через левое A' и правое A входные отверстия и выходят к глазам наблюдателя через левый и правый окуляр. Поле зрения каждого из окуляров имеет такой вид, как показано на рис. 189, б, т. е. оно разделено пополам горизонтальной линией. Таким образом получаются четыре участка поля зрения. Изображения в этих участках образуются следующим образом. Верхняя половина изображения от левой ветви дальномера находится в правом окуляре, а нижняя половина этого изображения — в левом окуляре. Верхняя половина изображения от правой ветви дальномера получается в левом окуляре, а нижняя половина того же изображения — в правом окуляре. Из рассматривания указанных рисунков ясно, что при наблюдении нижних полей зрения наблюдатель видит обычную стереоскопическую

картину, т. е. левым глазом смотрит на левое изображение, а правым глазом — на правое. В верхних же половинах поля зрения левый глаз видит правое изображение, а правый глаз — левое, т. е. наблюдателю представится псевдоскопическая картина.

Когда прибор будет отрегулирован таким образом, что в левом и правом полях зрения половинки изображения какого-то объекта находятся на одинаковых расстояниях, наблюдатель будет видеть и верхнюю и нижнюю половинки пространственного изображения расположенными на одной и той же глубине. Если наблюдаемый предмет перемещается вдоль фронта так, что его удаление от прибора остается постоянным, то половинки изображения сдвигаются в одну и ту же сторону без изменения их взаимного расположения и глубина их продолжает оставаться одинаковой.

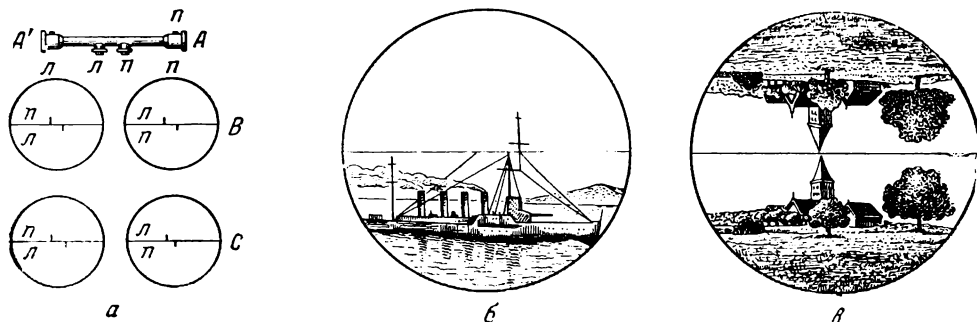


Рис. 189. Схема дальномера «стереоинцидент» (а). Поле зрения, видимое в окуляре дальномера «стереоинцидент» (б), и поле зрения, видимое в окуляре дальномера «стереоинверт» (в)

В тех случаях, когда объект приближается или удаляется, взаимное расположение половинок изменяется.

Предположим, что объект сдвигается так, что в левом поле расстояние между половинками изображения объекта стало больше первоначального, а в правом меньше первоначального. Стереоскопическое восприятие изображений, видимых левым и правым глазом, создаст впечатление, что половинки видимого объекта разошлись по глубине. Восстанавливая при помощи измерительного компенсатора равенство по глубине, можно отсчитать по дистанционной шкале расстояние до наблюдаемого объекта. Измерительные марки в таком дальномере не требуются. По сравнению с обычным дальномером этот тип прибора имеет следующие преимущества: во-первых, смещение изображений при изменении расстояний до объекта происходит как в левом, так и в правом поле зрения, и эффект расхождения половинок предмета по глубине получается вдвое большим, чем в обычном стереодальномере; во-вторых, производя измерение при помощи обычного дальномера, необходимо делать точную горизонтальную и вертикальную наводку дальномера и приводить изображение объекта почти до полного соприкосновения с измерительной маркой. Здесь же наблюдателю не приходится заботиться о точной горизонтальной наводке, так как измерение может быть сделано в любой точке линии раздела.

Дальномер стереоинверт. Конструкция дальномера стереоинверта незначительно отличается от дальномера стереоинцидент. В этом дальномере также получают по две половинки изображения поля зрения в каждом из окуляров. Различие заключается только в том, что верхние половинки не прямые, а перевернутые (рис. 189). В этом случае отдельно выступающие части предмета могут быть более удобно использованы для измерения. Одна из принципиальных схем подобного дальномера изображена на рис. 190. Прибор состоит как бы из двух дальномеров, смон-

ти юванных в общей трубе и сдвинутых друг относительно друга. Одна часть дальномера состоит из пентапризм 1 и 2, объективов 3, 3 и разделяющей призмы 4, которые направляют лучи от правого и левого поля зрения в левый окуляр 5. Другая часть дальномера составлена из пентапризм 1₁ и 2₁, объективов 3₁, 3₁ и разделяющей призмы 4₁. Лучи от разделяющей призмы направляются в правый окуляр 6. Измерительный компенсатор и дистанционная шкала на рис. 190 не показаны. Для получения перевернутого изображения верхней половины поля зрения в дальномере типа стереоинверт применяется несколько отличная по конструкции разделяющая призма, чем в дальномере типа стереокоинциденц; в остальной конструкции этих дальномеров между собой более или менее сходны.

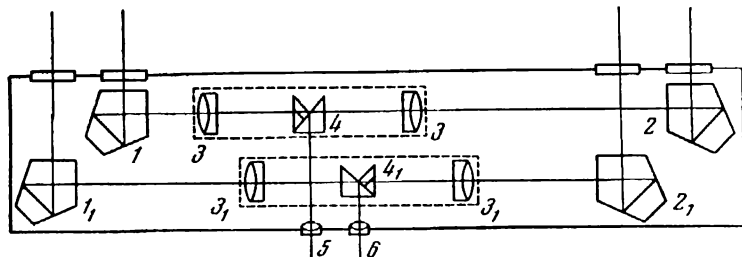


Рис. 190. Принципиальная схема дальномера «стереоинверт»

Современные стереодальномеры очень чувствительные оптические приборы. Точность измерения расстояния дальномером в настоящее время зависит уже не только от степени совершенства изготовления самого прибора, но и от целого ряда побочных причин: ограниченности остроты зрения, состояния атмосферы, освещенности и контрастности цели, формы и подвижности цели и т. д. Достаточно сказать, что современные дальномеры могут измерять параллактические углы в благоприятных условиях с точностью до $0'',2-0'',3$. В настоящее время, кроме высокой точности измерения углов, к дальномерам предъявляется требование устойчивости пространственного измерения в естественных условиях, т. е. при резких колебаниях температуры окружающей среды, при одностороннем нагревании дальномера солнцем, при тряске и т. п. Для этого применяется ряд мер по защите дальномера от такого рода внешних воздействий.

Для обеспечения стабильности работы дальномеры совершенствуются как в отношении их конструкции, так и в отношении применяемой системы оптики и отдельных узлов. В первую очередь это относится к концевым отражателям, объективу, измерителям выверочной системы и др. В современных стереодальномерах пентапризма почти не встречается в качестве концевой отражателя, а вместо нее используются концевые отражатели, состоящие из двух зеркал, расположенных под углом в 45° .

Дальномер усовершенствуется путем уменьшения его габаритов — применения телескопика, подбора материала и, наконец, устранения самой трубы дальномера, а также выноса измерительных марок из телескопа. В последнем случае применяют новый вид светящихся марок, которые находятся вне телескопа и специальным способом проектируются в фокальной плоскости вместе с изображением цели. Это позволяет избежать ряда ошибок в измерениях.

Применение схемы, рассмотренной нами выше и позволяющей использовать псевдоскопический эффект, устраняет личную ошибку стереоскописта в определении дистанции. Применяя новые методы выверки дальномера, достигают более устойчивых результатов измерения. В новейших конструкциях стереоскопических дальномеров создается ряд специальных приспособлений, дающих максимальные удобства для работы наблюдателя.

В качестве одной из наиболее усовершенствованных схем стереоскопического дальномера нового типа рассмотрим конструкцию дальномера, относящуюся к категории нерасстраивающихся.

Нерасстраивающиеся стереодальномеры. На рис. 191 представлена оптическая схема одной из моделей такого стереодальномера. В этой системе измерительные марки расположены вне зрительной трубы, в отдельной оптической системе, сопряженной со зрительной трубой. Оптическая система основной бинокулярной зрительной трубы составлена из двух одинаковых колен с зеркальными концевыми отражателями 3, объективами 4 (или 5), отклоняющими призмами 6, дополнительными

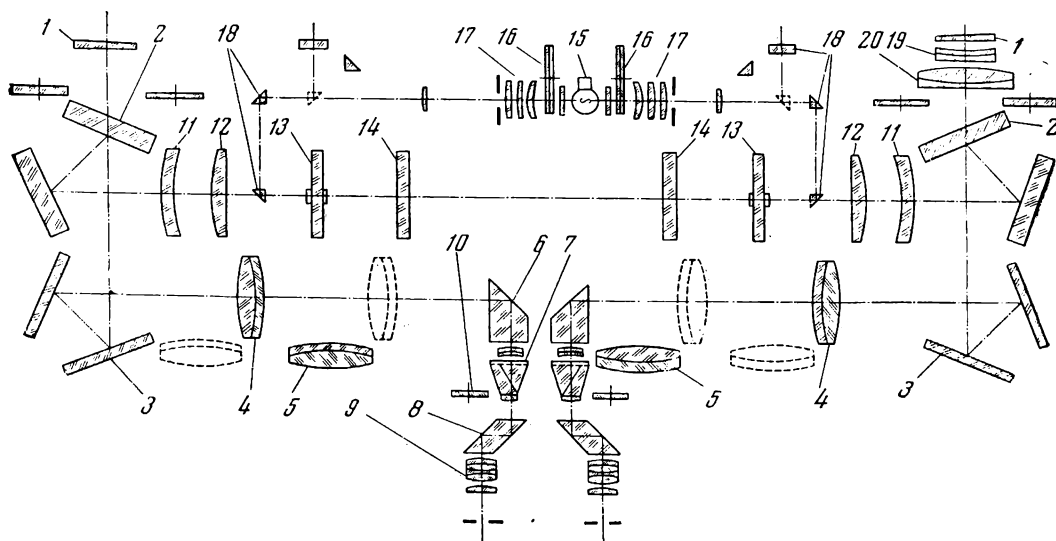


Рис. 191. Принципиальная схема нерасстраивающегося стереодальномера

(оборачивающими изображение) призмами Пехана 7, фильтрами 10 и окулярами 9, снабженными ромбическими призмами 8, позволяющими регулировать выходной базис прибора по межзрачковому расстоянию наблюдателя. Лучи от объекта входят в оптическую систему зрительной трубы через клинья 1 и линзовый измерительный компенсатор 19, 20, установленный только на правой ветви дальномера. Измерительные марки 13, 14 освещаются лампочкой 15 через конденсор, составленный из линз 16, 17 и призмы 18. При помощи двухлинзовых объективов 11, 12 измерительные марки проектируются в бесконечность. На пути хода этих лучей помещены дополнительные концевые отражатели 2, одна пластинка у которых полупрозрачная. Эта полупрозрачная пластинка поставлена на пути основного пучка лучей, идущих от наблюдаемого объекта в зрительные трубы, благодаря чему изображения марок проектируются в правую и в левую ветви дальномера. В фокальных плоскостях телескопа одновременно получают изображения удаленной цели и измерительных марок. Таким образом, любые изменения, происходящие в трубе дальномера и концевых отражателях 3, вызывают одинаковое смещение как изображения целей, так и изображения марок, сохраняя неизменным их взаимное расположение, благодаря чему получается нерасстраивающаяся оптическая система. Применение светящихся марок дает возможность подбирать яркость марок, мало отличающуюся от яркости цели, чем достигается возможность более точного измерения, так как менее яркие и менее контрастные цели всегда кажутся более удаленными, и уравнивание яркости марок с яркостью цели повышает точность наблюдения.

Дальномер имеет переменное увеличение, которое производится заменой объективов. Так как в данном приборе лучи света должны проходить через значительное количество оптических деталей, то для уменьшения потерь все наружные поверхности оптики делаются просветленными. Из приведенного выше описания можно заметить, что современные стереоскопические дальномеры, обладающие высокими точностями измерений, представляют собой довольно сложную оптическую систему.

§ 4. СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ АЭРОФОТОСЪЕМКА

Очень ценно применение стереоскопии при дешифрировании аэрофотоснимков. Стереоскопическое рассматривание аэроснимков позволяет очень быстро выявлять подробности рельефа сфотографированной земной поверхности и устанавливать местонахождение различных пространственных объектов на рассматриваемой местности. Эта быстрота получения сведений является очень важной особенностью при выполнении аэрофото-разведки стереоскопическим методом. Однако стереоскопическое фотографирование имеет большую ценность не только для такого рекогносцировочного выявления характера сфотографированной местности, но и для работ по составлению топографических карт местности. В настоящее время применение аэросъемки для производства геодезических и топографических работ носит массовый производственный характер.

Для стереоскопического различения рельефа земной поверхности с большой высоты необходимо иметь оптический прибор со значительным базисом между центрами проекции правого и левого изображений. Оптический прибор с требуемым базисом на самолете расположить трудно, поэтому рельеф местности выявляют путем стереоскопического рассматривания аэрофотоснимков, полученных последовательным экспонированием местности с разных точек траектории полета, поскольку такие снимки представляют собой сопряженные пары изображений.

Для рассматривания изображения сфотографированной местности в стереоскопе, необходимо, чтобы на последовательных снимках были захвачены одни и те же участки местности, над которой пролетал самолет. Такое фотографирование осуществляется при так называемой маршрутной съемке с перекрытием. Схема выполнения такой съемки представлена на рис. 192. На этой схеме видно, что при проведении последовательных съемок фотографируют каждый раз участки местности, частично уже сфотографированные на предыдущем снимке. На листе XXXI приведена пара таких аэроснимков, полученных при маршрутной съемке с перекрытием. Рассматривание этих снимков в стереоскопе дает ясное представление о рельефе сфотографированной местности.

Чтобы при стереоскопическом рассматривании аэроснимков получить впечатление правильного рельефа, необходимо правое и левое изображения в стереоскопе ориентировать таким образом, чтобы параллактическое смещение было горизонтальным и чтобы снимки были соответственно расположены перед правым и левым глазом наблюдателя. При движении самолета справа налево по плану местности необходимо, чтобы первый снимок рассматривался правым глазом, а второй снимок — левым. Точно так же должны рассматриваться и последующие снимки, т. е. при рассматривании второго и третьего снимков правый глаз должен видеть изображение второго снимка, а левый глаз — третьего.

В случае большого перекрытия при аэросъемке могут быть сфотографированы одни и те же участки местности не только на двух соседних снимках, но также и на большом количестве последовательно снятых изображений. В этом случае одна и та же местность может рассматриваться в стереоскопе с различными базисами; например, могут рассматриваться одновременно первый и третий или первый и четвертый снимки, базис

которых значительно превышает базис промежуточной пары снимков 1—2, 2—3 и 3—4.

В том случае, если парные аэрофотоснимки ориентированы в стереоскопе неправильно, то степень пластичности рассматриваемого на них изображения изменяется в зависимости от поворота этих снимков вокруг их центра. Изменения пластичности при различных поворотах снимков иллюстрируются схемами, приведенными на листе XXXI. На этом листе первая пара изображений 1 ориентирована правильно, т. е. соответствующие точки снятых объектов на обоих изображениях имеют смещение

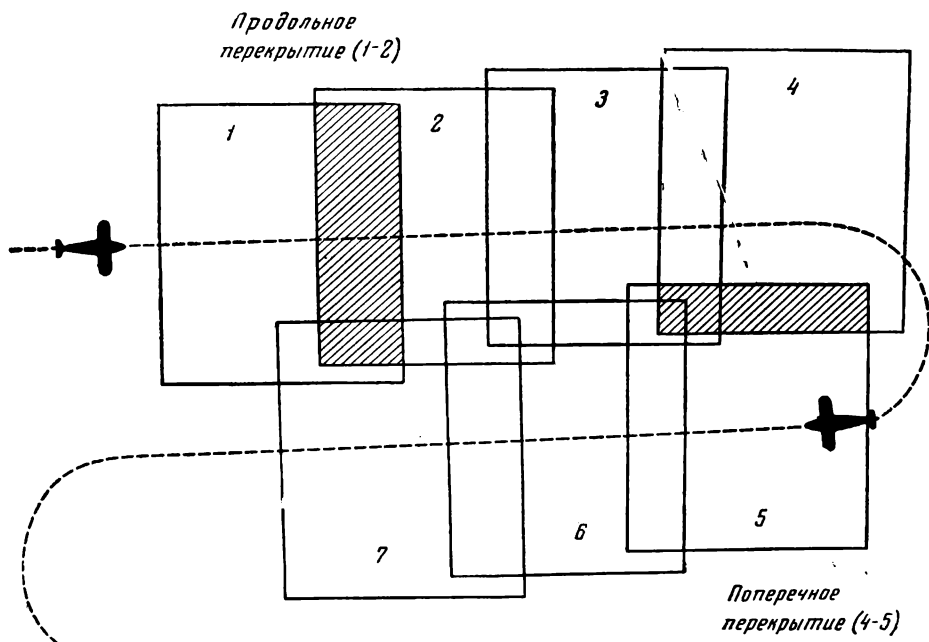


Рис. 192. Схема маршрутной аэрофотосъемки с перекрытием

вдоль линий, соединяющих центры этих изображений. Эти линии являются направлением полета самолета. На второй паре 2 каждое из изображений повернуто на 45° по часовой стрелке. Так как в данном случае горизонтальное смещение соответствующих объектов на снимках оказывается меньшим, то и впечатление рельефа при стереоскопическом рассмотрении этой пары уменьшается. Полное исчезновение рельефа получается при повороте изображений на 90° , представленном на третьей схеме (3). Самая нижняя — четвертая схема (4) изображает стереограмму, повернутую на 180° вокруг центров изображений. Рассмотрение такой стереограммы создает псевдоскопический эффект, так как в данном случае первый и второй снимки неправильно расположены по направлению полета и правый глаз видит изображение, предназначенное для левого глаза, а левый глаз — изображение, предназначенное для правого глаза.

Парные аэрофотоснимки могут изучаться не только при помощи стереоскопа, высота наблюдаемого рельефа местности на них может быть измерена и при помощи различного рода стереоскопических измерительных приборов. Для измерения рельефа в этом случае необходимо определять параллаксы соответствующих деталей парных изображений и необходимо знать более точно базис между соответствующими точками съемки правого и левого изображений.

Определение базиса между точками съемок последующих изображений при аэрофотографировании наиболее точно может быть выполнено расчетным путем на основании знания высоты полета, при которой производится аэросъемка. Высота полета при аэросъемке определяется в настоящее время обычно при помощи радиовысотомера и статоскопа, показания которых регистрируются на фотопленке одновременно с экспонированием местности. Радиовысотомер действует по принципу радиолокатора, определяя расстояние до поверхности земли по времени, необходимому для прохождения радиоизлучения на пути от самолета до земли и обратно. Принцип действия статоскопа основан на регистрации высоты полета по изменению барометрического давления посредством манометрических трубок с жидкостью. Регистрируя разность уровней в обеих коленах манометрической трубки, можно определять по известным барометрическим формулам разность высот полета.

§ 5. МЕТОДЫ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИИ

Для определения пространственных соотношений и получения полного геометрического представления о контурах и рельефе заснятой при аэрофотосъемке местности используются методы стереофотограмметрической обработки снимков. Они применимы и для анализа пространственных соотношений на любых других парных стереоскопических снимках. Применяя точные методы фотографирования с двух точек зрения, разделенных постоянным базисом, можно по полученным снимкам решать ряд вопросов, связанных с измерениями в инженерном деле, в различных областях науки и техники. Методами стереофотограмметрии выполняются измерения деформации сооружений, формообразования волн и струй в водяных потоках, измерения пространственных движений узлов механизмов, траектории полета снарядов. Этот метод применим для измерения рельефа на микроснимках, для измерения глубины травления шлифов, при рентгенографических исследованиях, для точных измерений треков элементарных частиц и т. п. Стереофотограмметрия применяется для изготовления точнейших копий скульптур, для измерений в области судебной медицины и в других случаях, когда требуется провести точные и надежные методы объективного контроля формы и геометрических размеров пространственных объектов.

Стереограмметрия представляет собой метод пространственных измерений заснятых объектов, основывающийся на геометрических зависимостях, существующих на снимках между изображениями стереограммы. Стереофотограмметрическая задача определения рельефа местности в принципе может решаться двумя путями: путем непосредственных промеров геометрических соотношений на пространственной модели объекта и путем вычислений, производимых на основе косвенных измерений.

I. Непосредственное определение рельефа в стереофотограмметрии производится путем обмера пространственной модели снятого объекта. Получение пространственной модели объекта основано на принципе обратного восстановления процесса фотографирования. Фотографируя предмет (рис. 193) с двух различных точек, разделенных базисом $SS' = B$, получают стереоскопическую пару снимков L и R . Поместив фотокамеры в прежнее положение относительно снятого предмета и проектируя лучи от полученных снимков, можно заметить, что восстановленные лучи точно проходят через соответствующие точки сфотографированного предмета. Убирая предмет, можно убедиться, что восстановленные лучи, пересекаясь в точках, соответствующих предмету, воспроизводят его геометрическую форму. Практическая сущность стереофотограмметрического процесса состоит именно в получении такой геометрической модели снятого

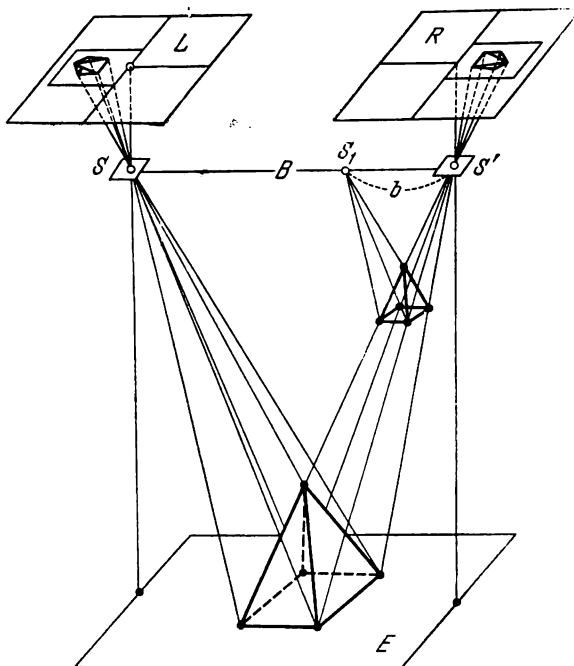


Рис. 193. Схема получения стереоскопической модели

полученных фигур и треугольников-засечек, масштаб восстановленной модели будет равен

$$\frac{1}{m} = \frac{b}{B}.$$

Следовательно, масштаб модели равен отношению базиса проектирования к базису фотографирования. Таким образом, имеется возможность всегда получить восстанавливаемую модель в желаемом масштабе. При фотографировании обширных участков местности (например, при аэрофотосъемке) геометрическая модель может быть восстановлена по частям.

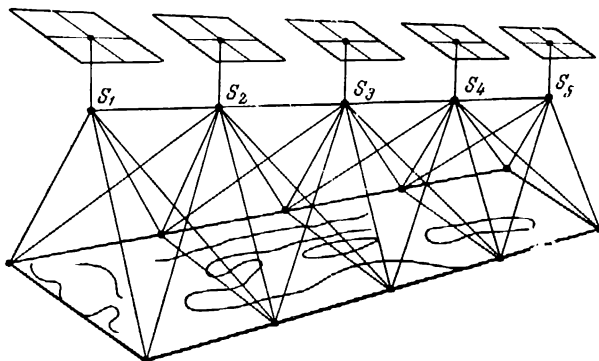


Рис. 194. Процесс оптического восстановления модели

Предположим, что снимаемым объектом является местность, при фотографировании которой получен ряд непрерывно перекрывающихся снимков. Тогда общая модель местности может быть восстановлена проектированием этих снимков на общий экран из ряда центров, расположенных в про-

объекта и обмере ее пространственных соотношений вместо обмера самого объекта.

Восстановив геометрическую модель предмета, можно изменять ее размер, не нарушая подобия восстановленной и действительной формы предмета. Изменение масштаба восстанавливаемой модели достигается перемещением одной из проектирующих фотокамер S вместе со снимком L вдоль базиса фотографирования (рис. 193) в положение S_1 . Очевидно, если снятый объект очень велик (например, аэроснимок участка местности), то подобным способом можно восстановить его модель в значительно уменьшенном виде. Если $S_1S' = b$ является базисом проектирования, то из подобия

пространстве подобно пространственному расположению объективов съемочных камер (рис. 194). Сущность процесса восстановления модели остается той же, как и раньше, только вместо пары снимков теперь имеется ряд снимков, который может быть разбит на отдельные пары. Например, второй снимок с центром проектирования S_2 образует стереопару с первым снимком S_1 и точно так же с третьим снимком S_3 . Таким образом, второй снимок S_2 связывает две соседние соприкасающиеся или несколько перекрывающиеся модели в единую систему, т. е. в общую модель. Аналогично третий снимок с центром проектирования S_3 будет общим, связующим для снимков с центрами проектирования S_2 и S_4 и т. д.

Таким образом, при помощи изображений, одновременно принадлежащих двум соприкасающимся моделям, или же при помощи общих перекрывающихся частей восстановленных моделей достигается связь между отдельными восстанавливаемыми моделями. Задача непрерывного восстановления общей модели местности обычно возникает при решении геодезических задач, связанных с составлением карт обширных участков местности. При съемке инженерных сооружений или отдельных объектов стереофотограмметрические задачи обычно решаются восстановлением модели только по двум снимкам.

II. Геометрические размеры стереоскопически сфотографированного объекта могут определяться и несколько другим путем. Вместо восстановления пространственной модели можно измерять параллакс на парных снимках. Обработывая результаты измерений по законам, устанавливающим связь между изображениями и предметом, можно получить необходимые данные о его форме, размере и положении. Таким путем можно строить топографический план спятого участка местности. Этот способ является посредственным решением стереофотограмметрической задачи. Как первый, так и второй способы геометрического определения объекта являются одинаково равноправными, и они оба широко используются в стереофотограмметрической практике.

Стереофотограмметрические измерения производятся несколько различными приемами, в зависимости от того, в стационарных условиях снимался объект с двух точек, с заранее измеренным между ними базисом, или объект фотографировался в два приема последовательно перемещающимся аппаратом, когда истинная величина базиса между точками съемки остается неизвестной, как при аэрофотосъемке. Методы обработки снимков в первом случае относятся к так называемой наземной стереофотограмметрии, а во втором — к воздушной стереофотограмметрии, поскольку последние относятся главным образом к обработке аэрофотоснимков.

Метод обработки стереоснимков, полученных в стационарных условиях при измеренном базисе между точками съемки, более прост, чем метод воздушной стереофотограмметрии, который является более общим методом, позволяющим обрабатывать любые снимки, сделанные в том числе и с неподвижных точек съемки. Обработка снимков, сделанных с подвижной базы, значительно сложнее, так как требует предварительного определения пространственного положения фотоснимков во время производства самих съемок, и уже только после этого позволяет приступить к определению по снимкам пространственного положения точек снятой поверхности.

Стереофотограмметрическая обработка аэроснимков привела в настоящее время к созданию двух принципиально отличных приемов воздушной стереофотограмметрии. Более старым методом является универсальный, и более молодым, широко разработанным в нашей стране — дифференцированный метод. Принципиальная схема того и другого метода представлена на рис. 195. Оба метода основаны на применении прямой геометрической засечки пространственного положения точки M лучами от изображений этой точки m и m' , полученными на двух снимках — L (левом)

и R (правом), снятых с концов базиса $SS' = B$. При применении универсального метода (рис. 195, а) для определения положения точки M необходимо, чтобы при проектировании базис и снимки занимали относительно плоскости экрана E такое же положение, которое они занимали в момент фотографирования относительно горизонтальной плоскости. Затем нужно восстановить направление проектирующих лучей оптическим путем, освещая негативы L и R . Определяемая точка M будет лежать на пересечении восстановленных лучей SM и $S'M$. Это пересечение лучей можно зафиксировать, например, перемещая небольшой экранчик E_1 в положение, при котором лучи дают на нем одно совмещенное изображение точки.

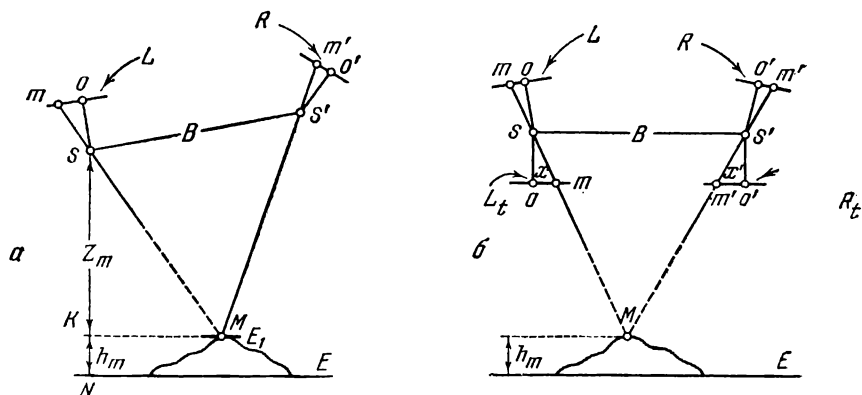


Рис. 195. Схема определения пространственного положения произвольной точки (M) на стереомодели

Непосредственно промеряя отрезки $SK = Z_m$ или $KN = h_m$, находят высоту определяемой точки M относительно левого конца базиса или превышение относительно исходной плоскости E . Две остальные координаты положения точки $X_m = KM$ и Y_m определяются непосредственным измерением в плоскости E_1 , параллельной E . Таким же образом путем восстановления проектирующих лучей могут быть определены три координаты X , Y , Z любой другой точки, зафиксированной на снимках L и R .

Обработка снимков по дифференцированному методу возможна только, когда базис съемки сопряженных изображений L и R (рис. 195, б) близок к горизонтальному положению. В этом методе снимки путем оптической трансформации приводятся сначала в горизонтальное положение. Исправленные трансформацией изображения L_t и R_t позволяют определить превышение h_m точки M из простейших геометрических соотношений между абсциссами x и x' исправленных изображений m и m' и элементов треугольника $SS'M$. В отечественной аппаратуре трансформирование изображений выполняется механическим путем одновременно с механическим измерением абсцисс точек m и m' , являющихся изображениями точки M . Промежуточный процесс получения трансформированных снимков L_t и R_t отсутствует, и все измерения ведутся по снимкам L и R . Аналогичным образом определяются превышения и всех других точек снимка.

Универсальный метод непосредственного решения прямой геометрической засечки связан с пространственным восстановлением проектирующих лучей, что приводит к необходимости применять стереофотограмметрические приборы пространственного типа с тремя осями измерения X , Y , Z . Дифференцированный метод косвенного решения прямой засечки не требует пространственного восстановления проектирующих лучей, благодаря чему и применяемые здесь приборы получают плоскостного

типа, т. е. имеют две оси измерения — X и Y . Они менее громоздки и более дешевы, чем приборы универсального типа.

При обработке аэрофотоснимков для составления топографических карт в зависимости от поставленной задачи и характера рельефа местности применяется тот или другой метод. Как правило, для съемки местности с крупным рельефом используются приборы универсального типа, а для съемки местности с рельефом, имеющим небольшие превышения, широко применяются приборы дифференцированного метода.

Оригинальные отечественные методы стереофотограмметрии разработаны проф. М. Д. Коншиным, проф. А. С. Скиридовым и др. Отечественная стереофотограмметрическая аппаратура создана проф. Ф. В. Дробышевым, проф. М. М. Русиновым и другими талантливыми конструкторами. На основе разработанной М. М. Русиновым широкоугольной проектирующей оптики создан один из наиболее совершенных приборов универсального типа — сверхширокоугольный аэропроектор мультиплекс. Сконструированные Ф. В. Дробышевым оригинальные стереометры развили советский метод дифференцированных процессов, превосходящий все известные зарубежные методы этого типа. За развитие техники стереофотограмметрии Н. В. Викторову, Ф. В. Дробышеву, М. Д. Коншину, М. М. Русинову и В. И. Семенову были присуждены государственные премии.

Ниже мы опишем некоторые типичные стереофотограмметрические приборы и принципы измерения рельефа определяемой поверхности.

§ 6. ПРИБОРЫ ДЛЯ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Наиболее совершенные образцы современной стереофотограмметрической аппаратуры представляют собой довольно сложные конструкции. В основу действия этих приборов положен принцип визуального определения геометрического положения точек объекта путем наблюдения за оптическим совмещением пространственной марки со стереоскопической моделью объекта, восстановленной по его снимкам.

Стереоскопическое зрение позволяет отождествлять изображения одной и той же точки местности, полученные на разных снимках. При оптическом совмещении наблюдается такого рода явление, если вследствие плохого опознавания точек на снимках марка окажется не совмещенной с одними и теми же точками пары снимков, то стереоскопически это воспринимается как пространственное несовмещение марки со стереоскопической моделью снятого объекта. Наоборот, если марка окажется совмещенной с одними и теми же точками изображений, то будет наблюдаться в пределах разрешающей способности пространственное совмещение марки и стереоскопической модели.

Таким образом, при работе на стереофотограмметрической аппаратуре используется сочетание измерительных и опознавательных свойств стереоскопического зрения, что создает исключительно благоприятные условия для быстрого и точного определения рельефа исследуемых поверхностей.

В стереофотограмметрической аппаратуре для оптического совмещения пространственного положения марки со стереоскопической моделью снятого объекта применяются в основном три способа: способ двух марок, способ реальной марки и анаглифический способ.

1. **Способ двух марок.** Этот широко применяемый способ сводится к тому, что стереоскопические изображения объекта измеряются при помощи пространственного изображения марки, возникающего при рассмотрении каждым глазом своей реальной марки. Идею способа можно рассмотреть на схеме топографического стереоскопа, представленной на рис. 196. Два снимка L и R , составляющих стереопару, рассматриваются в зеркальном стереоскопе через зеркала SS и $S'S'$ и окуляры l и r (рис.

196, а). В плоскости изображения с наблюдаемыми точками m и m' совмещены марки M и M' . Если изображения m и m' параллактически сдвинуты на снимках, то они дают пространственную стереоскопическую картину предмета m_0 , находящегося на пересечении лучей зрения (рис. 196, б).

Две идентичные марки M и M' стереоскопически воспринимаются как одна общая марка M_0 , тоже находящаяся на пересечении лучей зрения. Смещение одной марки, например M , в положение M_1 вдоль линии, параллельной зрительному базису b , создает впечатление пространственного перемещения марки M_0 по глубине в положение M'_0 . Одновременное перемещение обеих марок на одни и те же величины воспринимается

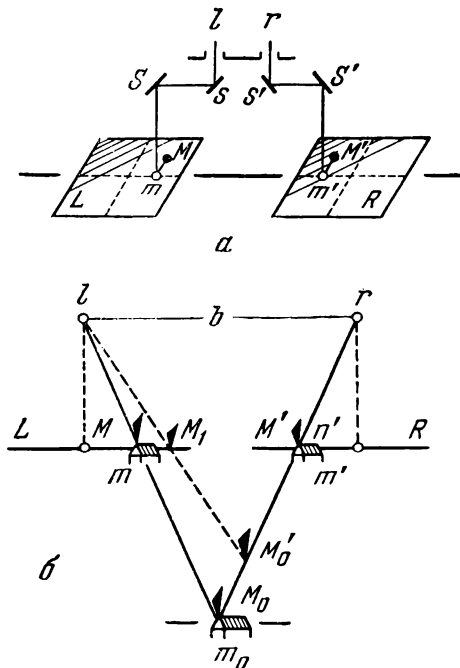


Рис. 196. Наблюдательная система с двумя марками m и m'

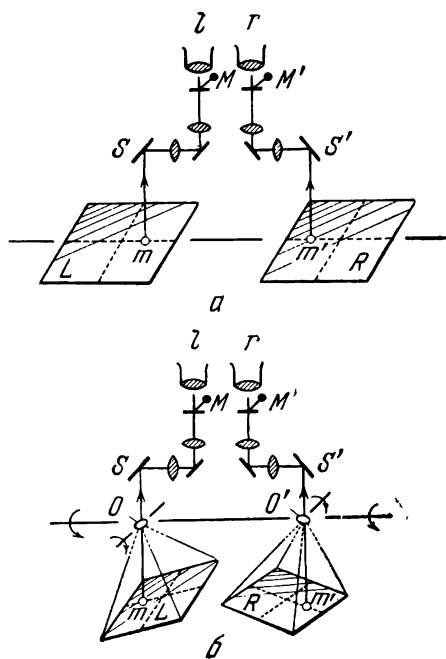


Рис. 197. Варианты способа «двух марок»

как перемещение стереоскопически видимой марки в плоскости без изменения ее положения по глубине. Таким образом, перемещением двух действительных марок M и M' только по двум координатам в плоскости изображений L и R можно воспроизвести перемещение видимой марки M_0 в пространстве по трем координатам. Это обстоятельство дает возможность конструировать стереофотограмметрическую аппаратуру плоскостного типа, в которой механизмы для пространственных измерений могут выполняться с движением только в одной плоскости (по двум осям координат вместо трех).

В такого рода приборах, вместо зеркального стереоскопа может быть применена и более сложная наблюдательная система для получения увеличения при рассматривании изображений. На рис. 197, а приведена одна из таких схем, в которой увеличенные сопряженные изображения точки m и m' оптически переносятся в фокальные плоскости окуляров l и r . В этих же фокальных плоскостях помещаются и две марки — M и M' . Оптическое совмещение марок с различными точками снимков L и R производится передвижением наблюдательной системы относительно снимков в одной плоскости.

Такого рода оптическая схема используется и в описанном выше стереокомпараторе, в котором для обзора различных участков изображения предусмотрена подвижность самих снимков в одном направлении и перемещение наблюдательной системы, выполненной в виде бинокулярного микроскопа, в поперечном направлении.

В тех приборах, которые предназначены для измерения рельефа по трансформированным снимкам, полученным при различных наклонах фотокамеры, применяют в качестве наблюдательной системы бинокулярную увеличительную трубу с увеличенным базисом (рис. 197, б), а фотоизображения L и R помещают в поворачиваемые проекционные камеры вокруг объективов O и O' , посредством которых восстанавливаются пучки лучей, проектировавшие картину при съемке. Измерительные марки M и M' помещаются в фокальных плоскостях окуляров l и r . Такого рода оптический принцип применяется в сложных автоматических приборах типа стереопланиграфа.

2. Способ реальной марки. В этом способе измерения производятся при помощи движения одной реальной марки, совершающей перемещения по глубине пространства стереоскопической модели снятого объекта. При осуществлении этого способа в зеркальном стереоскопе (рис. 198) применяют полупрозрачные зеркала. При рассмотрении стереоскопической пары снимков L и R сопряженные точки изображений левого и правого снимка

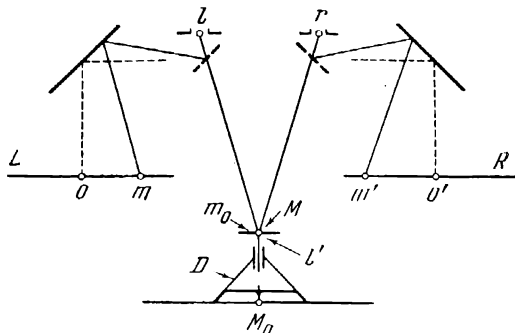


Рис. 198. Наблюдательная система по способу реальной марки M

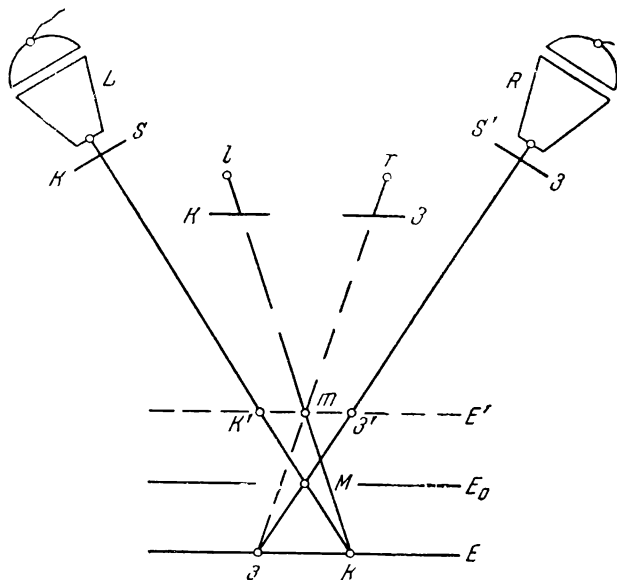


Рис. 199. Построение модели анаглифическим проектированием

L и R видны на продолжении лучей, идущих через окуляры l и r к глазам наблюдателя. Если на пересечении этих лучей поместить марку M , то ее можно будет увидеть через полупрозрачные зеркала одновременно с пространственным изображением точки m_0 . Таким образом, в стереоскопе будет видна рельефная модель снятого объекта, совмещенная с экранчиком l' измерительного столика D , с маркой M и чертежным устройством M_0 . Перемещая экранчик с маркой по высоте, а весь столик D вдоль стола E , можно отметить каждую точку стереоскопической модели на планшете, укрепленном на столе, т. е. можно произвести зарисовку

рельефа этой модели. Этот способ отличается наглядностью, но конструктивно встречает затруднения в осуществлении.

3. Анаглифический способ. Этот способ осуществляется проектированием двух изображений стереопары через цветные или поляризационные фильтры на общий экран. Изображения двух снимков проектируют при помощи двух камер L и R (рис. 199), оптические системы которых снабжаются фильтрами дополнительных цветов, например красным (K) и зеленым ($З$) (либо поляризационными фильтрами со взаимно-перпендикулярно ориентированными плоскостями поляризации). Наблюдая через очки-светофильтры K и $З$ изображения, спроектированные на экран, можно увидеть на затемненном от постороннего света экране две светящиеся точки k и $з$. Точка $з$, спроектированная зелеными лучами, будет видна только через зеленый светофильтр $З$ правым глазом r , а точка k , спроектированная красными лучами, будет видна через светофильтр K только левым глазом l . Зрительное слияние двух изображений точки, видимых правым и левым глазом, дает стереоскопическую модель точки m , видимую на пересечении лучей визирования lk и rz . Помимо этой модели, можно отметить вторую геометрическую модель точки M , лежащую на пересечении проектирующих лучей Sk и $S'з$. Эта точка непосредственно глазами не наблюдается.

Таким образом, при анаглифическом способе воспроизводятся две пространственные модели точки или предмета, — стереоскопическая m и геометрическая M , в общем случае не совпадающие друг с другом. Всякое перемещение экрана по глубине меняет относительное смещение точек k и $з$, вызывая изменения в наблюдаемой стереоскопической картине. Эти точки сливаются в одну в тот момент, когда экран совмещается с геометрической моделью точки M на пересечении лучей SM и $S'M$. В этом положении E_0 на экране стереоскопическая и геометрическая модели наблюдаемой точки совпадают, и, следовательно, положение точки M можно отметить на экране.

Практически для отметки рельефа при анаглифическом проектировании применяют специальный измерительный столик, на небольшом экранчике которого имеется светящаяся марка. При измерении марка совершает реальные пространственные перемещения, проекция которых отмечается чертежным приспособлением на экране E . Обладая наглядностью и простотой управления, анаглифический способ широко применяется при стереофотограмметрических работах. Вместо цветных светофильтров, в последнее время в этого рода аппаратуре используются поляризационные светофильтры в виде пленочных поляроидов, соответственным образом ориентированных у проектирующих камер и на очках наблюдателя. В этом случае применяется экран, не дополяризующий свет, например с металлизированным покрытием или в виде матового стекла.

Как мы уже заметили ранее, вся стереофотограмметрическая аппаратура по конструктивным формам разделяется на два основных типа — плоскостную и пространственную. Простейшим прибором плоскостного типа является описанный нами ранее стереокомпаратор. В случае обработки идеальных снимков (сделанных без наклона) при помощи этого прибора можно непосредственно на снимках вычерчивать наблюдаемый рельеф поверхности в виде горизонталей. Такое вычерчивание рельефа производится следующим образом.

Задавая в стереокомпараторе некоторое параллактическое смещение двум маркам, создают пространственную модель измерительной марки, лежащую на определенном уровне стереоскопической модели наблюдаемой поверхности объекта. Касаясь измерительной маркой поверхности стереоскопической модели, можно отмечать на снимке точки равных высот, через которые можно трассировать горизонталь, скользя маркой как бы по следу уреза воды, затопляющей стереоскопическую модель.

Таким путем может быть вычерчена одна горизонталь. Изменяя снова параллактическое смещение между марками, можно изменить глубину расположения стереоскопически видимой марки, и при этом новом положении ее аналогичным путем вычертить новую горизонталь на новом уровне высот.

Стереоскопатор пригоден только для рисовки горизонталей по снимкам идеального случая съемки. Однако практически при стереофотограмметрических измерениях приходится иметь дело со снимками, имеющими небольшие углы наклона. Так, при аэросъемке базис и снимки имеют

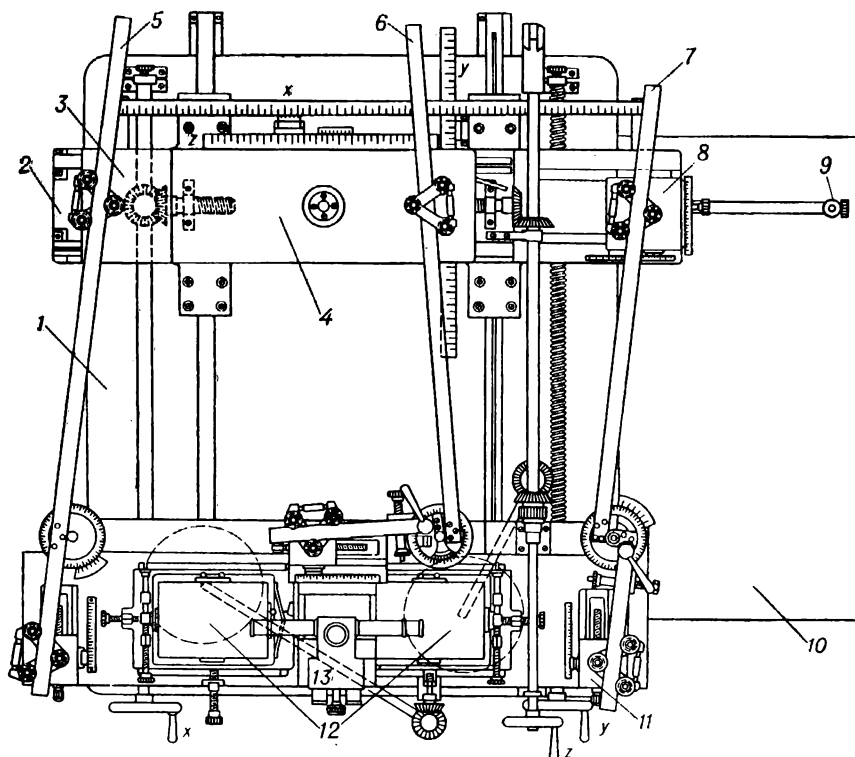


Рис. 200. Стереавтограф:

1 — станина; 2 — каретка координат y ; 3 — каретка координат x ; 4 — каретка координат z ; 5 — линейка левых направлений; 6 — линейка высот; 7 — линейка правых направлений; 8 — суппорт базисов модели; 9 — карандаш; 10 — планшет; 11 — суппорт фокусных расстояний; 12 — фотоснимки; 13 — бинокляр

угол наклона, доходящие до $3-5^\circ$. Для обработки таких снимков построены специальные приборы — стереометры. Эти приборы представляют собой точные стереоскопаторы, снабженные специальными коррекционными устройствами, позволяющими учитывать искажения снимков и исправлять значения измеряемых параллаксов.

К плоскостному типу стереофотограмметрических приборов относится также ряд других приборов, таких, как радиал-триангулятор, служащий для непосредственного измерения центральных углов на аэроснимках, используемых для вычисления положения точек фототриангуляционной сетки; керн-стереометр, предложенный А. С. Скиридовым для решения задачи взаимного ориентирования аэроснимков путем последовательного уничтожения вертикальных параллаксов; стереоавтограф, служащий для автоматического вычерчивания планов и профилей инженерных сооружений, топографических

планов местности и других объектов по снимкам, сделанным стационарной фотоаппаратурой, и др.

На рис. 200 показана одна из первых моделей стереоавтографа. По существу стереоавтограф представляет собой соединение стереокомпаратора с определяющим механизмом плоскостного типа, решающим задачу прямой засечки пространственного положения точек геометрической модели объекта. Основными частями определяющего механизма являются координатные каретки и три высокоточные подвижные линейки, служащие для засечек определяемых точек модели местности. Это один из простейших автоматических стереофотограмметрических приборов. Действие всего механизма происходит в одной рабочей плоскости. Механическое проектирование оптических лучей осуществляется в одной горизонтальной плоскости при помощи системы двух линеек. Направляющая дает проектирование лучей, идущих от левой стойки, линейка отстояния дает проектирование лучей, идущих от правой стойки. Этот механизм производит определение горизонтальной проекции искомой точки.

Определение высот при помощи проекции левого засекающего луча на вертикальную плоскость осуществляется третьей линейкой — линейкой высот. По конструктивным соображениям линейка высот имеет излом под прямым углом. Вся система линеек, имеющая вращательное движение, перемещается при помощи каретки отстояния и каретки высот. Перемещающиеся по каретке салазки передают суммарные результаты на карандаш, вынесенный над чертежным столом. Система линеек связана со стереокомпаратором через бинокулярный микроскоп, посредством которого можно следить за работой стереоавтографа. Этот прибор имеет специальное назначение для обработки результатов наземной стереофотосъемки. Помимо стереоавтографов с линейками, известны конструкции малых автографов, у которых засечка производится двумя пространственными рычагами. Эти автографы предназначаются для составления планов и профилей архитектурных сооружений, открытых выработок угольных месторождений и т. п.

Наиболее простыми приборами пространственного типа являются двойные проекторы, восстанавливающие геометрическую модель снятого участка местности при помощи двух проектирующих камер. Эти приборы предназначены для составления топографических карт универсальным методом. Схематически устройство двойного проектора показано на рис. 201. На двух консолях, YS и $Y'S'$, укреплены проектирующие камеры L и R , в рамках которых помещаются негативы или диапозитивы пары сопряженных снимков. Чтобы снимкам можно было придать углы наклона относительно экрана E , соответственно равные углам наклона при съемке относительно горизонта, и изменить масштаб проектирования, необходимо, чтобы одна из камер проектора имела шесть степеней свободы движения и вторая — минимум три. Левая камера, согласно схеме, имеет два угла наклона — продольный и поперечный, а также угол поворота снимка вокруг оптической оси. Правая камера, помимо аналогичных вращательных движений, имеет три поступательных базисных движения: b_x , b_y , b_z .

Выбрав базис проектирования SS' в некотором масштабе по сравнению с действительным базисом фотографирования и осветив снимки при помощи специального устройства, получим пучки проектирующих лучей, которые будут пересекаться вблизи экрана E . Одноименные проектирующие лучи, взаимно пересекаясь, восстанавливают геометрическую модель снятого участка местности. Для измерений рельефа служит небольшой измерительный столик E' со светящейся точечной маркой M и чертежным острием M_0 . Стереоскопическая модель объекта наблюдается методом цветных или поляризационных анаглифов. Для измерения превышений точек рельефа изменяют высоту экранчика по направляющей из-

мерительного столика, имеющего шкалу с точностью порядка 0,1 мм. При рисовке горизонталей на шкале измерительного столика устанавливают отсчет, соответствующий высоте горизонтали и, перемещая столик с маркой M , наблюдают за ее скольжением по стереоскопической модели, что соответствует соприкосновению марки с геометрической моделью. След движения чертежного приспособления M_0 на экране E является изображением горизонтали в ортогональной проекции. Для изображения контуров необходимо марку M перемещать в постоянном соприкосновении

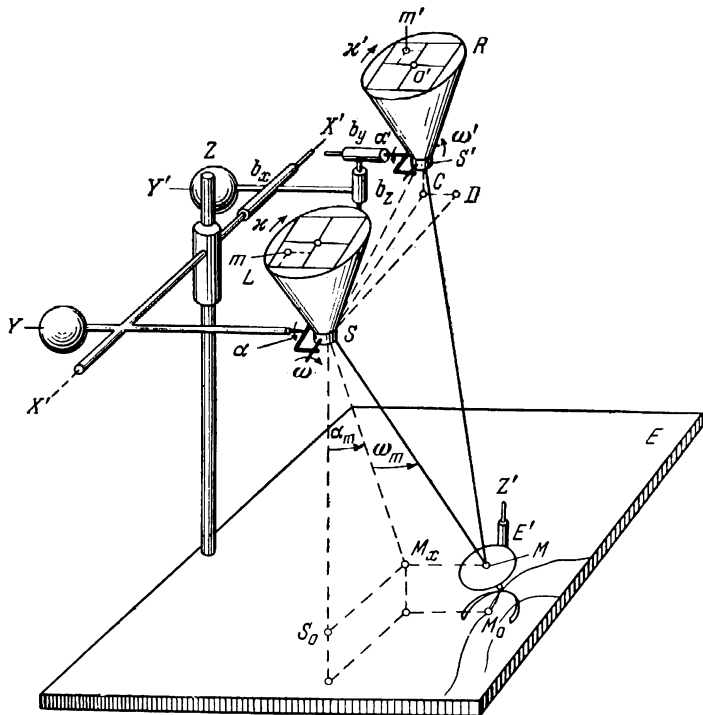


Рис. 201. Схема засечки в двойном проекторе

с наблюдаемой деталью. Последнее достигается одновременным перемещением столика по экрану E и марки с экранчиком E' по высоте. В двойных проекторах пространственная засечка представляет собой треугольник, опирающийся на базис проектирования $b = SS'$. Прямая засечка, определяющая пространственное положение точки M , фиксируемое измерительным столиком на экране E , определяется пересечением одноименных проектирующих лучей SM и $S'M$. При этом можно измерить координаты полученной точки M , спроектировав ее на основные плоскости прямоугольной системы координат, отнесенной к центру проектирования S левой камеры. Согласно построениям, получим $SS_0 = Z_m$, $S_0M_x = X_m$, $M_zM = Y_m$.

При практическом осуществлении двойных проекторов для проектирования изображений с уменьшенным базисом проектирующие камеры иногда располагают горизонтально, объективами навстречу друг другу, а отклонение лучей на горизонтальный экран производят при помощи наклонно укрепленных перед объективами зеркал.

Дальнейшим развитием конструкции двойных проекторов являются многокамерные проекторы, известные под названием м у л ь т и п л е к с ы. Эти проекторы предназначены для восстановления геометрической

модели местности, снятой при аэрофотографировании на данном маршруте. Для придания компактности прибору и исходя из необходимости иметь малые базы проектирования соседних снимков, проектирующие камеры и проектируемые фотоизображения уменьшают в несколько раз по сравнению с применяемыми при съемке фотокамерами и размерами негативов. Известны 6-, 9- и 21-проекторные мультиплексы. Они делятся на нормальные, широкоугольные и сверхширокоугольные. Рабочие углы каждого проектора соответственно равны 62° , 105° и 122° . В комплект аэропроекторов мультиплекс обычно входят уменьшитель снимков, дополнительные марки для фиксации опорных точек, пульт управления и анаглифические

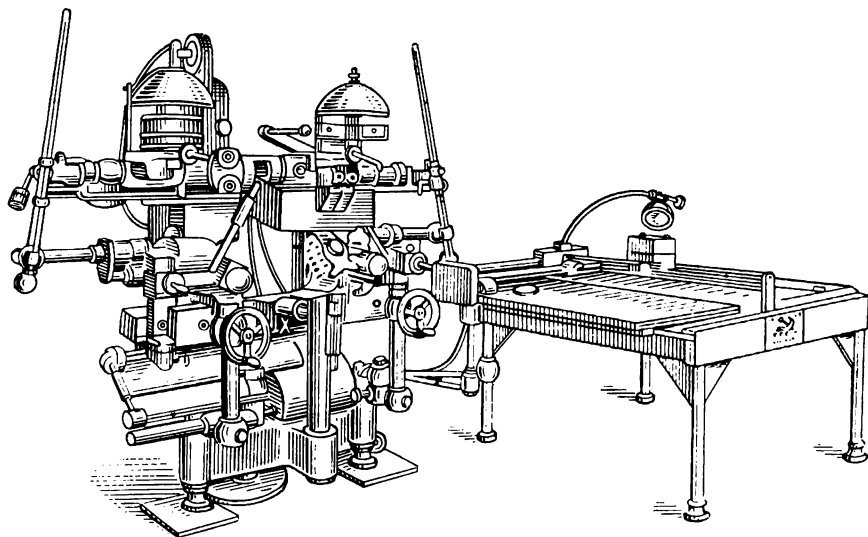


Рис. 202. Стереопланиграф

очки для наблюдения стереоскопической модели. Принцип определения рельефа по пространственному нахождению геометрической модели такой же, как и при работе на двойном проекторе.

Наиболее распространенным из высокоточных приборов универсального типа является стереопланиграф. Этот прибор предназначен для автоматического вычерчивания карт по снимкам воздушной или наземной фотосъемки. Стереопланиграф представляет собой прибор двойного проектирования (рис. 202). В приборе имеются две проектирующие камеры, позволяющие производить наклоны и взаимное ориентирование снимков, одинаковые с их пространственным ориентированием, бывшим во время съемки. Вместо проектирования обоих изображений на один общий экран со светящейся маркой в стереопланиграфе применяется проекция на два экранчика с двумя марками, которые стереоскопически должны представляться совмещающимися. Таким образом, пространственный треугольник, образованный двумя проектирующими лучами и линией базиса, в стереопланиграфе имеет вид проекции, составленной из отрезков прямой между узловыми точками объективов обеих камер проектирующими лучами и отрезком прямой между двумя марками. Базисом проектирования, следовательно, в стереопланиграфе является разность расстояний между узловыми точками объективов проектирующих камер и марками. Это создает большие удобства в работе на стереопланиграфе, позволяя произвольно изменять базис проектирования, не меняя взаимного расположения проектирующих камер.

Так, если не изменять расстояние между центрами проектирования, а увеличить его между марками, то это будет соответствовать уменьшению базиса проектирования. При равенстве расстояний между центрами проектирования и марками базис проектирования становится равным нулю и при дальнейшем увеличении расстояния между марками становится отрицательным. Подъем одной из марок вверх, например правой, равнозначен перемещению вниз другого, левого, центра проектирования, а выдвигание этой марки вперед соответствует перемещению другого центра проектирования назад. Благодаря этому вместо пространственного ориентирования центров проекции в стереопланиграфе **соответствующее ориентирование достигается перемещением марок.** Однако для восстановления нормальной проекции со снимков, сделанных при переносах съёмочных камер, каждая проектирующая камера в стереопланиграфе имеет возможность свободно вращаться вокруг трех взаимно-перпендикулярных осей.

Принципиальная схема конструкции стереопланиграфа представлена на рис. 203. Основание прибора составляют массивные станины X и Y , соединенные одна с другой и расположенные на трех винтах, которыми устанавливают горизонтальность верхних рабочих граней станины. По станине Y перемещается вертикальная колонна Z с точными направляющими. По колонне Z передвигается каретка высот с горизонтально расположенной осью вращения $x'x'$, к которой на осях вращения крепятся проектирующие камеры. Конструкция стереопланиграфа позволяет перемещать каретки с проектирующими камерами вдоль координатных осей Y и Z модели местности, каретку же с измерительными марками — вдоль координатной оси X .

Перед объективами камер находятся дополнительные оптические системы, которые при помощи инверсоров и параллелограммов обеспечивают получение резкого изображения на марках M и M' отражателей. Последние вращаются относительно двух направлений, при этом карданы с марками расположены на суппортах, которые в свою очередь можно перемещать на величины b_z и b_y . Суппорты b_x расположены на каретке X прибора. Посредством оптической и бинокулярной зрительной системы изображения снимков с наложенными на них марками создают в глазах наблюдателя эффект стереомодели местности.

Перемещение камер по координатам Y и Z , а кареток базисными суппортами по координате X позволяет вычерчивать план в контурах и горизонталях, что практически осуществляется при помощи координатографа, помещающегося на отдельном столе и связанного со стереопланиграфом карданными передачами. Координатограф имеет два взаимно-перпендикулярных движения X_k и Y_k , которые при помощи ведущих винтов

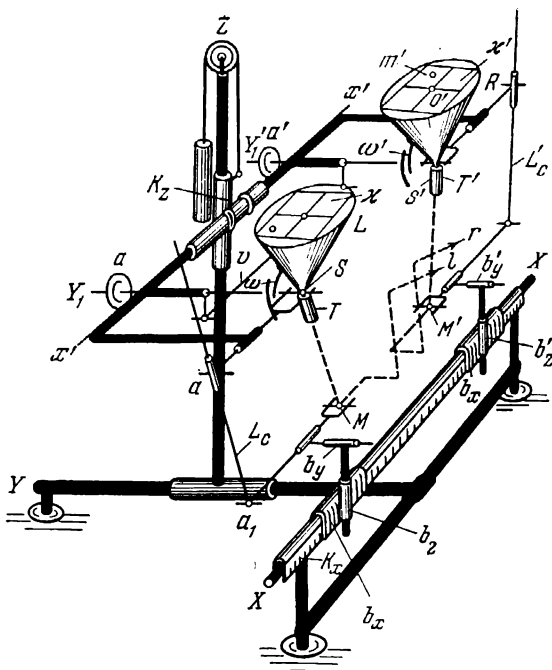


Рис. 203. Схема стереопланиграфа

передаются чертежному приспособлению. Винты координатографа соединены с ведущими винтами стереопланиграфа X и Y , благодаря чему чертежное приспособление повторяет соответствующие движения прибора, графически фиксируя их на планшете. Обводя маркой контуры или горизонтали на стереоскопически наблюдаемой модели, вычерчивают их на планшете при помощи чертежного приспособления.

Наряду со стереопланиграфом существует еще ряд подобных автоматических приборов универсального типа. К ним относятся аэрокартограф, аэротопограф, автограф, чертежно-рисовальный стереоприбор и другие, в которых иногда применяются обобщающие принципы универсального и дифференцированного методов. Некоторых из этих приборов мы коснемся ниже.

§ 7. ИНЖЕНЕРНАЯ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

Применение стереофотограмметрического метода для измерения геометрических форм инженерных сооружений архитектурных памятников, механических конструкций, различных физических объектов отличается от применения этого метода в аэрофотокартографировании тем, что при наземном положении съемочных камер между ними может быть точно измерен базис, а сами камеры могут быть соответствующим образом точно ориентированы. Это обстоятельство позволяет облегчить проведение последующих измерений полученных снимков.

Наземную стереофотограмметрическую съемку обычно производят при помощи фототеодолитов, которые представляют собой системы, состоящие из фотокамеры, теодолита и приспособления для измерения базисов фотографирования. В более старых конструкциях фотокамера и теодолит были соединены вместе. В позднейших конструкциях фотокамера и теодолит обычно разделены, но могут заменять друг друга при установке на штатив.

В раздельных конструкциях фотокамера снабжается специальным ориентирующим устройством для придания ей надлежащего положения относительно горизонта и базиса. Теодолит, как правило, снабжается специальным приспособлением для измерения базиса. По этому принципу построены фототеодолиты повышенной точности, выпускаемые отечественной промышленностью. При фототеодолитной съемке используют фотокамеры с постоянным фокусным расстоянием и снимают на фотопластинках с мелкозернистой эмульсией. Объективы применяют с небольшим относительным отверстием, но хорошо скорректированные, чтобы обеспечить высокую разрешающую способность фотографического изображения и минимальные его искажения. В фототеодолите завода «Геодезия» фотокамера рассчитана на применение пластинок размером 13×18 см и снабжена объективом «Ортопротар» с фокусным расстоянием 19 см и относительным отверстием 1:25.

Стереофотограмметрическую съемку при помощи фототеодолитов производят обычно следующим образом. Предварительно выбирают на местности две точки с хорошим обзором объекта, позволяющие фотографировать весь объект. Затем измеряют базис между этими точками. Для этого обычно на левом конце базиса по направлению съемки устанавливают теодолит, а на правом — горизонтальную рейку для измерения длины базиса. Сняв теодолит, на его место устанавливают фотокамеру, имеющую устройство, позволяющее ориентировать направление ее оптической оси относительно базиса. Фотографирование ведут последовательно с левого и правого концов базиса при строго горизонтальном направлении оптической оси, расположенной нормально к направлению базиса. При такой съемке получают стереоскопическую пару снимков нормального случая съемки. Для расширения угла охвата объекта фотокамеру дополни-

тельно поворачивают влево, а затем вправо на 30° и делают еще два снимка. В результате получают две дополнительные стереоскопические пары снимков с осями, равномерно отклоненными от осей снимков нормального случая съемки. Измерения полученных снимков для определения положения отдельных точек объекта могут производиться при помощи стереокомпаратора. Рельеф на больших поверхностях определяют измерением снимков на стереоавтографах и стереопланиграфах, при помощи которых непосредственно вычерчивают рельеф в виде горизонталей.

Схема геометрического определения положения сфотографированной точки при теодолитной съемке представлена на рис. 204. Значение координат принимаем центр проектирования левой камеры O_a , относительно которого и определяется положение снимаемой точки N .

Принимая оптическую ось левой камеры $O_a N'_1$ за направление оси Z ; NN_1 , вертикаль, проходящую через исследуемую точку N , — за ось Y , а горизонталь, параллельную съемочному базису B_c , — за направление оси X , из подобия треугольников $O_a N'_1 O_b$ и $n_b O_b t$ можно вычислить отстояние точки N , определяемое как расстояние от центра проекции левой камеры O_a до вертикальной плоскости, проходящей параллельно линии базиса через точку N :

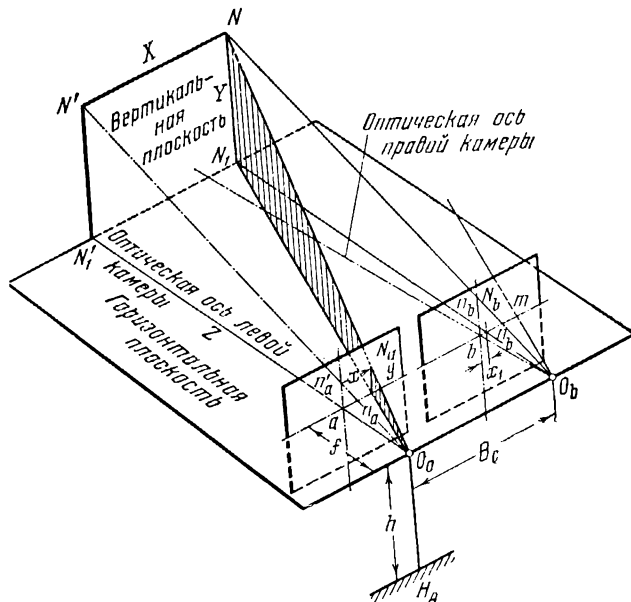


Рис. 204. Схема геометрического определения положения точки при теодолитной съемке

$$Z = \frac{B_c}{p} f, \quad (1)$$

где f — фокусное расстояние камеры фототеодолита, $p = x - x_1$ — горизонтальный параллакс точки N , равный разности горизонтальных координат этой точки на снимках. По этой формуле может быть определено отстояние любой точки снимаемого объекта от вертикальной плоскости, проходящей через съемочный базис. Из подобия треугольников $N'_1 O_a N_1$ и $a O_a n_a$ замечаем, что расстояние X от точки N до вертикальной плоскости, проходящей через оптическую ось левой камеры, может быть определено как

$$X = \frac{Z}{f} x, \quad (2)$$

где x — горизонтальная координата изображения точки на левом снимке. В полученное выражение подставляем величину Z , определенную выше (1) и тогда имеем

$$X = \frac{B_c}{p} x, \quad (3)$$

деляемой точки M относительно центра проектирования S находится при помощи координат

$$Z = S'K \quad \text{и} \quad X = C'M,$$

построенных в масштабе базиса $SS' = B' = B:m$.

Для определения высоты точки M следует отложить $Oe = y$. В этом случае $C'M$ будет равно координате y точки M . Практически для таких вычислений пользуются номограммой, представляющей специальную доску с подвижными линейками и шкалами, построенными по схеме рассмотренного выше чертежа. Несмотря на относительную простоту, графический способ решения задачи применяется для определения небольшого числа точек, поскольку вычерчивание горизонталей при помощи номограммы крайне затруднительно.

Одним из ответственных этапов фототеодолитной съемки является выбор надлежащей величины базиса фотографирования и его измерения с достаточной точностью, так как от величины базиса зависит точность определения координат искомых точек. Допустим, что на фотографическом снимке при помощи приборов мы можем измерять параллаксы с точностью Δp , и рассмотрим две точки, координаты, расстояния которых определяются

$$Z_1 = \frac{Bf}{p} \quad \text{и} \quad Z_2 = \frac{Bf}{p + \Delta p}.$$

Очевидно, эти точки будут лежать на минимальном расстоянии друг от друга, которое можно еще измерить по снимкам. Расстояние между координатами этих точек определяет пределы возможной точности измерения координат положения точки.

Таким образом, возможная ошибка, при определении расстояния Z может быть выражена величиной

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 = \frac{Bf}{p + \Delta p} - \frac{Bf}{p}.$$

Или, делая простые преобразования, получим

$$\Delta Z = \frac{Z^2}{\frac{Bf}{\Delta p} - Z}. \quad (7)$$

Определяя из этого выражения величину базиса, имеем

$$B = \frac{\Delta p (Z^2 + Z\Delta Z)}{f\Delta Z}. \quad (8)$$

Пренебрегая вторым членом ввиду его малости, можно приближенно писать

$$B \approx \frac{Z^2}{f} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta Z}. \quad (9)$$

Очевидно, минимальная величина базиса может быть определена из последнего выражения при подстановке в него действительных значений входящих величин.

Так, например, при съемке архитектурной детали с расстояния $Z = 5$ м фототеодолитом «Геодезия», имеющим фокусное расстояние объектива $f = 0,19$ м и при разрешающей способности фотографического материала 40 линий/мм, т. е. при $\Delta p = 0,000025$ м, для различения деталей, отличающихся по глубине на величину $\Delta Z \geq 5$ мм (0,005 м), минимальное значение базиса определится величиной

$$B_{\min} \approx \frac{5^2 \cdot 0,000025}{0,19 \cdot 0,005} = 0,66 \text{ м.}$$

Максимальное значение базиса съемки определяется условиями, обеспечивающими слитное зрительное восприятие стереоскопической картины по двум парным снимкам. Для перспективных снимков максимальный угол визирования, который обеспечивает слитное восприятие стереоскопической модели, составляет 16° ($0,28 \text{ рад}$). Отсюда следует требование

$$B_{\text{макс}} \approx 0,28 Z. \quad (10)$$

Максимальное значение базиса при условиях съемки в рассмотренном выше примере, согласно (9), определяется величиной

$$B_{\text{макс}} \approx 0,28 \cdot 5 = 1,4 \text{ м.}$$

В условиях таким образом проводимой фототеодолитной съемки точность измерения двух других координат измеряемой точки может быть определена дифференцированием выражений (2) и (4). Переходя к конечным приращениям этих координат, можно записать:

$$\Delta X = \frac{Z}{f} \Delta x + \frac{x}{f} \Delta Z, \quad (11)$$

$$\Delta Y = \frac{Z}{f} \Delta y + \frac{y}{f} \Delta Z. \quad (12)$$

Здесь x и y — соответственно горизонтальная и вертикальная координаты изображения измеряемой точки на снимке (обычно на левом снимке), Δx и Δy — соответственно минимально измеримые приращения этих координат.

Фототеодолитная съемка уже давно применяется на строительных работах, при железнодорожных и гидротехнических изысканиях. Наземная стереофотограмметрическая съемка нашла применение и при геологических изысканиях, поисках полезных ископаемых. С ее помощью с достаточной точностью определяются относительные высоты обнажений и их форма, углы видимого и истинного падения пластов различных пород, трещины, жилы, сдвиги и т. д. Этот вид съемки полезен для фиксации следов землетрясений, обвалов, оползней, вулканических извержений и т. д.

Специфические формы фототеодолитная съемка приобретает при использовании ее в гидрографии. Помимо съемки берегов, ее применяют для съемки морских волн, чтобы измерить их высоту, длину и скорость перемещения. В таких случаях выполняется синхронная съемка двумя фототеодолитами. На посу и корме корабля крепятся фототеодолиты, затворы камер которых управляются с поста наблюдателя. Обработка снимков (произведенных во время крена корабля) ведется сперва в условной базисной системе координат, а затем приводится к горизонту.

Кроме этого, фототеодолитную съемку можно применять в горном деле, мелиорации, строительстве, возведении специальных инженерных сооружений, при составлении топографических карт горных районов: вообще она может быть широко использована во всех инженерных изысканиях.

Упрощенную стереофотограмметрическую съемку можно производить при помощи простейших средств — любой фотокамерой с точно измеренным фокусным расстоянием и измерительными приспособлениями для определения базиса съемки и промера координат отдельных точек изображения на полученных снимках. Такие методы стереофотограмметрических измерений позволяют пользоваться ими для решения отдельно возникающих задач на различных производствах и при проведении отдельных экспериментальных работ. Стереофотограмметрический метод оказался, например, возможным применить для определения качества полировки

металлических изделий, строя горизонтали рельефа поверхности через 2 мм. Высокая точность и объективность измерений, даваемая методом, позволяют широко применять его в самых различных областях техники и в научных исследованиях.

§ 8. ПРОСТЕЙШИЕ МЕТОДЫ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В ряде случаев, когда не предъявляются особенно высокие требования к точности измерений, геометрическое определение формы и размеров изучаемых объектов может выполняться с достаточной быстротой простейшими средствами стереофотограмметрии. Стереофотограмметрическая съемка объекта может производиться в этом случае обычными стереофотоаппаратами либо путем последовательного фотографирования любой однообъективной фотокамерой. Зарисовку рельефа поверхности снятого объекта в виде горизонталей простейшим путем можно выполнить, наблюдая стереоскопическую модель снятого объекта при помощи любого стереоскопа. А измерения действительных координат отдельных точек исследуемого объекта можно произвести расчетным путем, измерив при помощи простейших средств параллаксы соответственных изображений этой точки, полученных на правом и левом снимках.

Ниже мы приведем описание одного из вариантов выполнения такого рода съемки, предложенного проф. С. В. Орловым, с применением однообъективной фотокамеры. В качестве фотоаппарата в данном случае могут быть использованы и малоформатные аппараты типа «Зоркий», «Зенит», «Киев» или любительские камеры «Турист», «Москва» и т. п. Чтобы произвести съемку объекта с двух концов базиса, передвигают фотоаппарат по специальной доске в два положения таким образом, что оптические оси объектива аппарата оставались параллельными самим себе в первом и втором положениях. Для выполнения такого перемещения может применяться хорошо выструганная доска с упорной планкой, устанавливаемая горизонтально на двух штативах.

Первый снимок производят с левого конца базиса, предварительно плотно прижав заднюю стенку фотокамеры к планке, и замечают положение по шкале, нанесенной на планке. Перезарядив после первого снимка фотокамеру, передвигают ее вправо на длину выбранного базиса и, прижав фотокамеру плотно к планке, производят второй снимок. Перед съемкой рулеткой измеряют расстояние по перпендикуляру от базиса до одного из ближайших предметов, например до положенного на землю бумажного кружка, причем расстояние измеряется по проекции в горизонтальной плоскости. Это измерение помогает уточнить результаты вычисления координат объекта по полученным снимкам. После произведенной съемки записывают время и место съемки, сфотографированный объект, величину взятого базиса, величину фокусного расстояния объектива и измеренное расстояние до избранного контрольного предмета (с точным описанием его) или до бумажного кружка.

По полученным снимкам можно измерить размеры и положения любых точек снятого объекта. Если снимок сделан на кадр размером 24×36 мм, то, увеличив оба негатива в 1,6 раза, можно получить стереограмму, могущую рассматриваться в обычный (линзовый) стереоскоп.

Необходимая величина съемочного базиса выбирается по соотношению, определенному нами выше:

$$B = \frac{\Delta x (Z^2 + Z\Delta Z)}{f\Delta Z}, \quad (1)$$

где Δx — возможная ошибка при определении измерительным инструментом положения точек изображения на снимках, f — фокусное расстояние объектива фотокамеры, Z — расстояние до снимаемого объектива,

ΔZ — минимально различимая глубина рельефа. Выбор необходимой величины съемочного базиса в зависимости от требуемой точности различения глубины рельефа может производиться по заранее рассчитанным таблицам.

Ниже мы приводим табл. 5, в которой определены минимально различимые величины глубины рельефа ΔZ в зависимости от удаленности объекта Z и от величины базиса съемки B для случаев съемки фотокамерами с фокусным расстоянием объективов f , равным 5 и 10,5 см при точности измерения деталей на снимках $x = 0,05$ мм. Все величины в таблице выражены в сантиметрах.

Таблица 5

$Z, \text{ см}$	$f = 5 \text{ см}$				$f = 10,5 \text{ см}$				
	$B, \text{ см}$				$B, \text{ см}$				
	30	40	50	60	30	40	50	60	70
	$\Delta Z, \text{ см}$				$\Delta Z, \text{ см}$				
444	5	4	3	3	3	2	2	1	1
600	12	10	7	6	5	4	3	3	2
800	22	16	13	11	10	6	6	5	4
1000	34	26	20	17	16	12	10	8	7
1200	50	37	30	25	23	17	13	12	10
1400	68	50	40	36	32	24	19	17	13
1600	90	67	53	47	42	31	25	22	18

Вычисление пространственных координат какой-либо точки объекта производится по формулам:

$$Z = \frac{fB}{p}, \quad (2)$$

$$X = \frac{x}{f} Z, \quad (3)$$

$$Y = \frac{y}{f} Z. \quad (4)$$

В этих формулах X и Y — координаты изображения определяемой точки, измеряемые на левом снимке от центра негатива соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях, p — горизонтальный параллакс изображений точки, полученной на снимках.

Для измерения величины параллакса и координат измеряемой точки на снимках можно воспользоваться целлулоидной линейкой с делениями через 1 или 0,5 мм. При отсчитывании измеряемых отрезков необходима лупа с пятикратным увеличением и палетка. В качестве палетки может быть использована диапозитивная пластинка, на которой тонкими черными штрихами нанесена миллиметровая прямоугольная сетка.

Прежде чем производить измерения, необходимо отрезать кусок пленки со снятыми двумя изображениями стереограммы (при этом не следует отрезать друг от друга правый и левый снимки). Накладывая линейку на негативы, определяют расстояния d между парными изображениями всех интересующих объектов. Точность измерения, если пользоваться лупой, может быть обеспечена в пределах 0,05—0,1 мм. Так как расстояние Z от одного из объектов до базиса было измерено при съемке, то, зная длину взятого базиса B и фокусное расстояние объектива камеры, легко вычислить полученный параллакс на снимках этого объекта по формуле

$$p = \frac{fB}{Z}. \quad (5)$$

Измеряя также расстояние между парными изображениями этого объекта на снимке, можно определить нулевой параллакс p_0 , равный расстоянию между центрами снятых кадров. Промеренное расстояние d состоит из суммы двух величин параллакса p и расстояния между центрами кадров. Следовательно, измеряя расстояния между парными изображениями любых других точек снятого объекта, можно определить параллакс любой точки, вычитая p_0 из измеренного расстояния d , т. е. параллакс любой точки можно определить по формуле

$$p = d - p_0. \quad (6)$$

По найденному параллаксу, пользуясь приведенной выше формулой (2), можно вычислить координату Z определяемой точки, т. е. установить расстояние этой точки от центра объектива фотокамеры, находившейся во время съемки на левом конце базиса.

Для определения координат X и Y берут палетку и накладывают ее на левый снимок. Для удобства измерений на снимке проводят координатные линии через какую-либо заметную точку, по возможности расположенную ближе к центру. Координаты этой точки принимают равными

$$X = 0 \quad \text{и} \quad Y = 0.$$

Для окончательного вычисления геометрических размеров объекта выбор начала координат не имеет никакого значения, так как размеры определяются по разности координат. При определении величины координат y палетку следует накладывать на снимки таким образом, чтобы одна из горизонтальных линий палетки, от которой производится отсчет координаты y , непременно лежала на точке, принятой за начало координат, а при определении величины координат x одна из вертикальных линий палетки должна проходить через эту точку. Подставляя измеренные величины x и y в приведенные ранее формулы (3) и (4), находят соответственно координаты определяемой точки X и Y .

Определив координаты одной точки X_1, Y_1, Z_1 и координаты другой точки X_2, Y_2, Z_2 , можно вычислить истинное расстояние между двумя точками M_1 и M_2 по формуле

$$\overline{M_1 M_2} = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2}. \quad (7)$$

Здесь $Y_2 - Y_1$ — расстояние между горизонтальными плоскостями, в которых расположены точки M_1 и M_2 ; $Z_2 - Z_1$ — расстояние между вертикальными плоскостями, параллельными базису; $X_2 - X_1$ — расстояние между вертикальными плоскостями, перпендикулярными базису, в которых расположены эти точки.

Рельеф всей поверхности сфотографированного объекта, при не очень высоких требованиях к точности, можно зарисовать, наблюдая полученные снимки в любой стереоскоп и проводя горизонталы на снимок по пикетным точкам, т. е. по точкам с определенными заранее высотами. Однако для зарисовки рельефа на полученных снимках в виде горизонталей удобнее пользоваться специальными стереоскопами, предназначенными для этих целей.

В качестве таких стереоскопов можно с успехом применять зеркально-линзовые стереоскопы Л-3 и Д-5, выпускаемые нашей промышленностью. Стереоскоп Л-3 (рис. 206) складного типа, линзы, помещенные между зеркалами, дают 1,5-кратное увеличение. Поле зрения стереоскопа 8×8 см. Внутренние зеркала в некоторых образцах имеют поступательное перемещение для установки окулярной системы по межзрачковому расстоянию наблюдателя. Стереоскоп Д-5 крепится на стойке упаковоч-

ного футляра и имеет откидные линзы, укрепленные ниже внешних зеркал. Увеличение окулярной системы двухкратное, поле зрения составляет 6×6 см. Откинув линзы и переместив стереоскоп по высоте, можно получить поле зрения, охватывающее снимок размером 18×18 см при кратности увеличения, равной 0,8. Отсутствие опорных ножек у этого стереоскопа делает его более удобным для рисовки рельефа на снимке, открывая к нему свободный доступ.

При наблюдении парных снимков в стереоскопе их предварительно ориентируют. Для этого снимки *L* и *R* (рис. 206) помещают под стереоскопом таким образом, чтобы их перекрывающиеся части (левая и правая) были соответственно в поле зрения левой и правой частей стереоскопа.

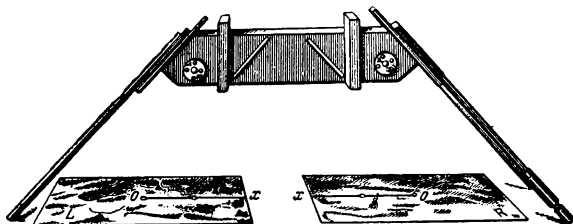


Рис. 206. Зеркально-линзовый стереоскоп Л-3

Перемещая и поворачивая снимки, устанавливают их так, чтобы изображение съемочного базиса на снимках было параллельно базису глаз наблюдателя. Дополнительно перемещая снимки вдоль базиса по оси *xx*, улучшают полученный стереоэффект путем согласования аккомодации и конвергенции глаз. Полученную стереоскопическую картину просматривают в пределах всего перекрытия снимков, для чего, закрепив снимки, перемещают зеркальный стереоскоп поступательно по линии, перпендикулярной базису снимков, т. е. в направлении оси.

В случае замечаемого нарушения стереоэффекта стереоскоп дополнительно подрегулируют небольшими поворотами в плоскости изображений. Просматривая стереокартину, следят за согласованностью ее рельефа с положением пикетных точек, рельеф которых предварительно определяется соответствующими вычислениями. К пикетным точкам предъявляется требование, чтобы они соответствовали характерным точкам рельефа, позволяющим выполнить интерполирование при проведении горизонталей. Рисовку горизонталей для объектов с сильно выраженным рельефом ведут непосредственно по снимкам. Для объектов со слабо выраженным рельефом предварительно по снимкам составляют фотосхему, на которой рисуют горизонтالي. Последнее объясняется тем, что на снимках при слабо выраженном рельефе трудно уловить общую закономерность рельефа, без чего рисовка горизонталей крайне затруднена.

Перед тем как начать рисовку горизонталей, просматривают в стереоскопе всю стереомодель снятого объекта, изучают общую закономерность рельефа, мысленно выделяя его главные формы. После этого начинают рисовку горизонталей на наиболее ясно выраженных участках рельефа, например на общих склонах. Седловины и другие участки, переходные от одной главной формы рельефа к другой, оставляют под конец рисовки. Для правильного интерполирования высот необходимо ясно представить себе поперечный профиль вдоль линии интерполяции. Закончив рисовку рельефа, проверяют общую закономерность полученных горизонталей. Для этого мысленно убирают второстепенные детали рельефа и следят, чтобы общее направление горизонталей было согласовано с основными формами рельефа. Переходя к проверке детализировки рельефа, обращают

внимание на отдельные изгибы горизонталей, которые должны равномерно передаваться соседним горизонталям.

Полное использование измерительных свойств стереоснимков с построением по ним топографических планов возможно только на автоматических приборах, таких, как стереопланиграфы. Однако эти сложные приборы в известных случаях могут быть с успехом заменены более простыми универсальными стереоприборами малых форм. Одним из таких универсальных приборов, выполненных по сравнительно простой схеме, является стереоскопический чертежно-рисовальный прибор, предложенный проф. М. Д. Коншиным. Пользуясь таким прибором, можно значительно легче и намного точнее зарисовать в виде горизонталей рельеф сфотографированного объекта, чем это можно сделать на обычных стереоскопах.

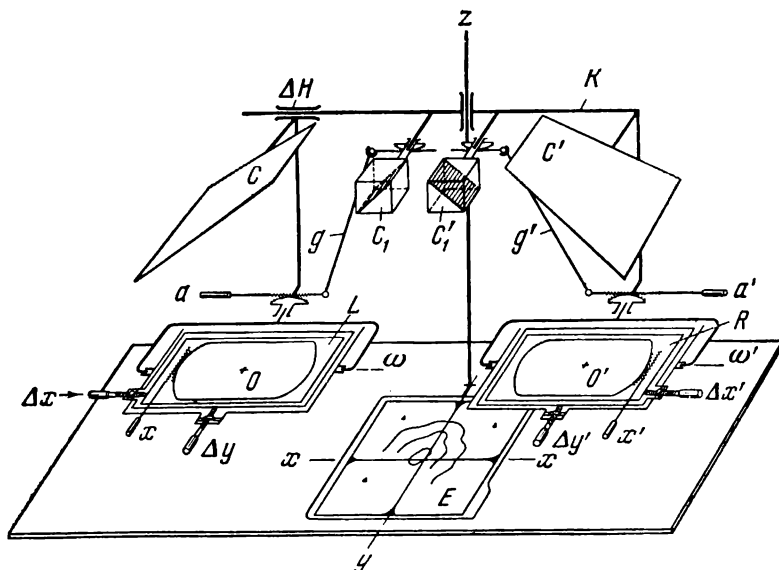


Рис. 207. Схема стереоскопического рисовального прибора

Схема устройства стереоскопического рисовального прибора РП-6 системы М. Д. Коншина, изображена на рис. 207. Принцип действия прибора основан на восстановлении стереоскопической модели и непосредственно геометрическом измерении ее по способу реальной марки. Устроен прибор следующим образом. На основной вертикальной направляющей стойке Z укреплен горизонтальная каретка K , могущая перемещаться вверх и вниз. Каретка несет наблюдательную систему и кассеты L и R левого и правого снимков. Под наблюдательной системой между кассетами помещается экран E , на котором крепятся планшеты для рисовки или перерисовки горизонталей и контуров с наблюдаемых снимков. В качестве наблюдательной системы служит зеркальный стереоскоп, внешние зеркала которого C и C' имеют постоянный наклон в 45° относительно экрана E . Вместо малых зеркал поставлены стеклянные кубы C_1 и C'_1 , диагональные отражающие плоскости которых полупрозрачны, благодаря чему можно одновременно наблюдать как снимки, так и экран E . Левая кассета L смонтирована на малой каретке ΔH , которая перемещается по направляющей каретке K , чем достигается в случае необходимости приведение снимка L к масштабу снимка R . Каждая кассета имеет возможность делать поворот вокруг трех осей для ориентирования снимков относительно экрана E . Кроме того, кассеты имеют свободу перемещения Δx и Δy для введения линейной децентрации снимков.

Прибор работает следующим образом. На кассеты устанавливают контактные отпечатки стереопары и приближенно ориентируют их до момента получения стереоэффекта. На столе прибора укрепляют планшет. Правое и левое изображения совмещают с опорными точками планшета, перемещая снимки по высоте, наклоняя и поворачивая их. Затем, точно совмещая одноименные точки изображения, создают стереомодель, которую наблюдатель видит в пространстве экрана E . Измерение масштаба стереоскопической модели достигается при помощи вращения кубов, что изменяет направление проектирующих лучей. Для устранения возникающих при этом перспективных смещений одновременно вращают кассеты на двойные углы в противоположном направлении, для чего служит шарнирное устройство g, g' .

Прибор снабжен бинокулярной насадкой и другими приспособлениями, создающими удобства при наблюдении снимков. Созданная в результате ориентирования снимков стереоскопическая модель, наблюдаемая в окуляры прибора, рассекается экраном E . След сечения, соответствующий горизонтали, зарисовывается на планшете от руки карандашом, который представляет собой как бы реальную марку, лежащую в плоскости планшета. Переместив каретку K по вертикальной оси Z на высоту новой горизонтали, рисуют рельеф и контуры объекта, прилегающие к этой новой горизонтали. Восстановленная стереоскопическая модель, рассекаемая экраном, позволяет осуществлять наглядный контроль положения горизонталей на стереомодели, что выгодно отличает работу на этом приборе по сравнению с другими методами обработки стереоснимков.

§ 9. ОСОБЕННОСТИ ЗРИТЕЛЬНОЙ ДЕШИФРОВКИ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ

При наблюдении пространственной картины в стереоскопе или других стереоприборах возможные ошибки в определении геометрической формы видимого изображения зависят от большого количества причин, которые определяются психофизиологическими особенностями зрительного восприятия, а также и внешними условиями, зависящими от конструкции данного прибора, условий, при которых работает прибор, и других причин. Поэтому при пользовании стереоскопическими приборами необходимо учитывать как особенности стереоскопического восприятия, так и особенности работы стереоскопических приборов в различных условиях.

Остановимся на рассмотрении особенностей зрительного восприятия при наблюдении стереоскопической картины, получаемой при помощи прибора. При оценке глубины расположения отдельных деталей в стереоскопической картине прежде всего необходимо учитывать, что наибольшей остроты стереоскопическое восприятие достигает только при условии, когда сравниваемые по глубине предметы расположены близко один от другого как по глубине, так и по фронту, т. е. когда линии визирования на них проходят близко одна к другой. Это обстоятельство немаловажно при стереоскопических измерениях, выполняемых, например, при помощи стереодальномеров. Поясним это на примере.

На листе XXXII сверху изображена стереограмма, в которой представлены три случая измерения глубины силуэтного предмета при сравнении его с расположением марки. В кружке I представлен силуэт домика и марки в виде ромбика. Эта марка при стереоскопическом рассмотрении кажется очень близкой от наблюдателя по сравнению с домиком. При этом замечается двоение либо домика, либо марки, смотря по тому, на что фиксированы глаза наблюдателя — на марку или на домик, но стереоскопическое восприятие при этом сохраняется, причем изображения домика и марки кажутся весьма различными по величине.

В кружке 2 показано воспроизведение близких по величине и по глубине предметов. Около угольников расположены две марки, причем верхняя более удалена от угольника, чем нижняя. В кружке 3 показана та же картина и для таких же взаимно удаленных предметов по глубине, но раздвинутых дальше по фронту. Хотя здесь эффект глубины воспринимается, но он менее отчетливо виден, чем при наблюдении изображения, показанного в кружке 2. Если один предмет расположить над другим, стереоскопический эффект восстанавливается. Это явление показано на средней стереограмме.

Изображения, представленные в кружках 1 и 3, иллюстрируют нарушения восприятия глубины между домиком и маркой. В первом случае изображение марки расположено по обе стороны шпиля домика, во втором случае для левого глаза марка и силуэт домика видны в одном направлении, причем одно изображение проектируется на башенку, другое — вне ее. В кружках 2 и 4, при том же взаимном расположении деталей рисунка, положение марки вынесено над предметом, вследствие чего восстанавливается стереоскопическое восприятие, в чем легко убедиться, рассматривая это изображение в стереоскопе.

Надо иметь в виду, что рассматривание равных горизонтальных линий не дает восприятия глубины между ними. Это отсутствие заметной глубины можно наблюдать при стереоскопическом рассматривании, например, телеграфных проводов, идущих по фронту поля зрения, если на этих проводах не заметно никаких выделяющихся предметов. Мы воспринимаем глубину только в том случае, если на сетчатке одного глаза имеется смещение изображения относительно идентичных точек изображений сетчатки другого глаза. Эти смещения происходят в направлении, параллельном межзрачковому базису, а для того, чтобы получить стереоскопический эффект, это смещение должно оцениваться по отношению к каким-либо резким деталям предметов. Очевидно, что для гладких проводов, расположенных параллельно межзрачковому базису, никаких смещений мы наблюдать не можем. Однако стоит немного наклонить голову набок, чтобы изображения проводов пересекали сетчатку в другом направлении, и тогда сразу появляется восприятие пространственного их расположения.

На нижней стереограмме, воспроизведенной на листе XXXII, фигура 1 иллюстрирует это явление. Силуэт здания имеет две марки — одну над острой частью, другую над длинной горизонтальной частью здания. Хотя обе марки нарисованы так, что их удаление от силуэта одинаково, однако для второй глубина ощущается значительно слабее вследствие того, что она расположена над горизонтальной частью предмета, не имеющей никаких опознавательных выступов.

В бинокулярных приборах нарушение стереоскопического восприятия происходит, как мы говорили, и от дефекта самих приборов. Обе части прибора должны давать изображения совершенно одинакового расположения. Если же одна часть прибора дает перекошенное изображение, в то время как во второй части изображение расположено прямо, то совокупность таких изображений дает двоение картины без восприятия глубины. В бинокулярных приборах с внутренними марками (стереодальномер-компараторы) может происходить нарушение установки марки по высоте. На предыдущей стереограмме в кружке 2 показан такой случай, когда марка для каждого глаза видна на различной высоте от предмета. В таком случае восприятия глубины не получается. Происходит двоение изображения.

Чтобы устранить или свести к минимуму ошибки в стереоскопическом восприятии, зависящие от оптического прибора, необходимо точно выверить и испытать действие этого оптического прибора. Обычно испытание стереоскопических приборов производится вначале в лабораторной установке, позволяющей исключать очень сложное участие влияния различных

внешних условий. После этого производится испытание стереоскопического прибора в полевой обстановке или в той обстановке, в которой он будет работать. Это испытание должно производиться таким образом, чтобы, насколько это возможно, разделить влияние различных факторов, нарушающих правильную работу прибора, например выяснить влияние неравномерного нагрева прибора, плохой видимости из-за атмосферных помех, влияние воздушных потоков и т. д. После полного испытания прибора можно получить представление, какие из замеченных ошибок следует отнести за счет неисправности самого прибора, а какие происходят от внешних ошибок и как данный прибор противодействует внешним воздействиям.

Рассматривая работу стереоскопического прибора, можно выявить ошибки, даваемые этим прибором, т. е. ошибки, которые зависят исключительно от конструкции самого прибора и условий его эксплуатации, но не зависят от погрешности измерений, делаемых наблюдателем. Общие же ошибки измерения, выполняемого при помощи стереоскопических приборов, складываются из теоретической ошибки прибора и личной ошибки, вносимой индивидуально наблюдателем. Под личной ошибкой понимаются различные индивидуальные свойства наблюдателей, вследствие которых при работе на одном и том же стереоскопическом приборе при одной и той же выверке получают систематическую разницу отсчетов деления шкалы. Эти ошибки зависят от индивидуальных особенностей психофизиологического восприятия отдельными наблюдателями.

Чтобы обеспечить наиболее точное измерение глубины на стереоскопических изображениях при работе на стереоскопических приборах, очень большое значение имеет отбор наблюдателей и их тренировка для работы на этом приборе. Отбор производится на основании исследования зрения при помощи специальных приборов. Для такого испытания вполне пригодны объективные стереоскопы и специальные таблицы. Конечно, к работе на стереоскопических приборах должны допускаться лица, не имеющие общих дефектов зрения. Испытание стереоскопического зрения производится при помощи рассматривания в стереоскопе специальных испытательных таблиц, например типа приведенных на листе XXXIII (вверху). Эти таблицы представляют собой стереограммы различного рода силуэтных изображений, отличающихся глубиной расположения. Если при рассматривании в стереоскопе этих изображений наблюдатель правильно может назвать расположение отдельных фигур, то следует перейти к деталям на силуэтах. Лица с хорошей остротой стереоскопического зрения должны давать правильные ответы для всех десяти силуэтов. При исследовании зрения по таблицам испытуемый должен вначале рассматривать более грубые детали, а затем более мелкие.

Расположение силуэтов по глубине, начиная с самого близкого к наблюдателю до наиболее удаленного, определяется следующими номерами фигур: 9, 1, 3, 7, 2, 5, 4, 8, 6, 10. Около каждого силуэта имеются две марки: треугольник и парик. Эти марки расположены на разных удалениях от своего силуэта, причем на силуэте 10 эти взаимные удаления очень большие, но постепенно они уменьшаются по направлению к силуэту 1, где достигают своего предела 15" (что соответствует наблюдению в стереоскопе с фокусным расстоянием линз, равным 15 см). Разница в параллактических углах между маркой и каким-либо силуэтом равна параллактическому расстоянию в одном силуэте, т. е. 15" умноженных на номер данного силуэта. Следовательно, для силуэта 10 удаление будет составлять 150".

Определение способности к стереоскопическому восприятию может производиться и при помощи *с т е р е о м и к р о м е т р а*, изображенного на рис. 208. Стереоскопический микрометр представляет собой линзовый стереоскоп, к столику которого прикреплена рамка с двумя «ука-

зателями», могущими передвигаться в вертикальном и горизонтальном направлениях. Эти перемещения обычно осуществляются посредством микрометрического винта.

Для отбора наблюдателей на столике стереомикрометра устанавливается какая-либо стереоскопическая таблица, например изображенная нами на предыдущем рисунке, и указатели подводятся к какой-либо детали таблицы. Необходимо обращать внимание, чтобы острия указателя были расположены на некоторой высоте по отношению к выбранному силуэту, над ним или сбоку. Эти острия и служат в данном случае в качестве движущейся измерительной марки. Рассматривание таблицы дает стереоскопическое восприятие силуэтов, изображенных на таблице, и один из

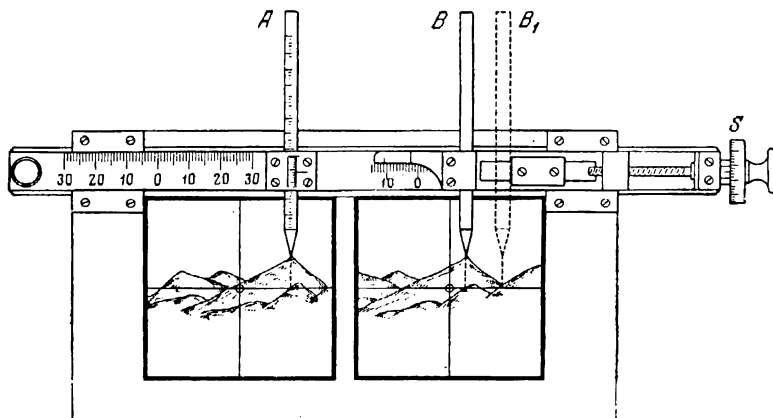


Рис. 208. Стереоскопический микрометр

указателей рамки при помощи микрометрического винта передвигается вправо и влево, отчего стереоскопически воспринимается перемещение указателя в глубину по отношению к какой-либо детали таблицы.

На такой установке можно получать совмещение марок по глубине с различными деталями силуэтов. Эта глубина может быть отсчитана по делениям на шкале микрометра. Так, например, если деление на шкале соответствует линейному параллаксу $0,01\text{ мм}$, то при фокусном расстоянии линз стереоскопа, равном 150 мм , это соответствует параллактическому углу $15''$. С таким микрометром можно проверять различные особенности стереоскопического зрения. Можно, например, наблюдать нарушение стереоскопического эффекта, когда оба указателя установлены своими остриями не на одном уровне, проверить падение точности в определении глубины, если острия расположены далеко от рассматриваемой детали таблицы. Если одно острие стоит по одну сторону детали, а другое — по другую, но на одном уровне с этой деталью, получается двоение изображения и отсутствует стереоскопическое восприятие.

Выше мы разбирали вопрос об отборе наблюдателя и его тренировке при помощи стереоскопов. Однако подготовка наблюдателя для работы на стереоскопических приборах не решается окончательно. Обычно после тренировки, например на стереомикрометре, он должен перейти к тренировке на том стереоскопическом приборе, на котором будет работать в дальнейшем.

Глава VIII

СТЕРЕОСКОПИЯ В ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОМ ИСКУССТВЕ

§ 1. Применение стереоскопии в изобразительном искусстве. § 2. Принципы изготовления фотоскульптуры и фоторельефа. § 3. Рисование стереоскопических изображений. § 4. Графическое построение стереограмм. § 5. Механическое рисование стереограмм. § 6. Стереоскопическая живопись. § 7. Искусственные стереоскопические иллюзии. § 8. Стереоскопическое воспроизведение скульптурных изображений.

§ 1. ПРИМЕНЕНИЕ СТЕРЕОСКОПИИ В ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОМ ИСКУССТВЕ

Техника стереоскопического воспроизведения изображений открывает богатые перспективы в изобразительном искусстве для художественного воссоздания пространственных образов. Мы уже заметили, как обогащает зрительный образ стереоскопическое воспроизведение кинокартины, телевидения, художественной фотографии. Во всех этих случаях воспроизводится оптический пространственный образ реальной природы (листы XXXIV, XXXVII—XXXVIII). Но надо сказать, что этим не ограничивают. ся возможности использования стереоскопии в изобразительном искусстве.

При помощи стереоскопической техники могут воспроизводиться и объемные изображения, являющиеся творчеством художественной фантазии. Современные стереоскопические приборы дают художнику полную возможность создавать пространственные картины. Перед ним открываются возможности графического исполнения стереоскопических изображений, создания совершенно новой формы изобразительного искусства — с т е р е о с к о п и ч е с к о й ж и в о п и с и.

Наряду с этим стереоскопическая техника дает скульптору новые возможности в его работе над созданием пространственных образов, при помощи так называемой фотоскульптуры. Стереоскопические измерительные приборы дают возможность скульптору точно воспроизводить пространственный рельеф по заданным на чертеже профилям сечений. Стереоскопическим контролем в своей работе уже пользуются с успехом некоторые скульпторы. Так, С. М. Орлов использовал систематическую стереофотосъемку при создании памятника основателю Москвы Юрию Долгорукому, что позволяло ему не только определять общее состояние скульптуры, но и видеть то, что было им задумано, сделано вначале и сравнивать с тем, что сделано позднее.

Особенно интересным приложением стереоскопической техники к воспроизведению скульптурных произведений являются перспективы создания автоматического метода изготовления скульптур по стереоскопическим фотографиям действительного объекта. Возможность фотографического изготовления скульптур на основе современных стереоскопических приборов достаточно реальна.

Наконец, следует иметь в виду практические возможности использования стереоскопии в прикладном искусстве. Уже давно известны различ-

ного рода аттракционы, называемые «чудеса теней», которые использовали для создания зрительных иллюзий анаглифические методы. При помощи проекции стереоскопических пар изображений поляризованным светом можно построить такую волшебную панораму, которую зритель сможет увидеть, пользуясь поляроидными очками, а без таких очков он будет видеть пустой экран без какого-либо признака изображения. Подобные волшебные стереоиллюзии могут с применением двухлучепреломляющих прозрачных пленок создавать цветные окраски воспроизводимых изображений, видимые только при наблюдении через поляроидные очки благодаря интерференции поляризованных лучей. Очень эффектным стереоскопическим аттракционом является стереоскопический калейдоскоп.

Однако стереоскопические рисунки и чертежи нельзя рассматривать только с точки зрения их художественной ценности или развлекательности. Они могут служить как достаточно ценными техническими пособиями для контроля различных производственных процессов, конструкций, так и наглядными учебными пособиями. Стереоскопическая объемная иллюстрация уже широко проникает в самые различные учебные дисциплины, начиная с техники, математики, физики и кончая медициной и искусством. Достаточно привести только некоторые примеры использования стереоскопического рисунка в качестве объемных печатных иллюстраций в издаваемых у нас книгах и учебниках, таких, как «Альбом стереоизображений по начертательной геометрии» (М. А. Шестаков, М., Стройиздат, 1935); «Альбом стереоскопических чертежей-анаглифов к курсу стереометрии» (Г. А. Владимирский, М., Учпедгиз, 1939); «Стереоальбом к курсу зоологии» (И. В. Козырь, М., Учпедгиз, 1939); «Стереоальбомы по кристаллографии» (Е. Е. Флинт и А. Д. Анваер, ч. 1—2, Учпедгиз, 1939—1940); «Объемная печатная иллюстрация» (С. Г. Гуревич, «Искусство», 1959).

Стереоскопическими рисунками иллюстрированы такие книги, как Советская Медицинская Энциклопедия; А. В. Шубников, Е. Е. Флинт, Г. Б. Бокий «Основы кристаллографии» (Изд-во АН СССР, 1940); Ф. Морс и Г. Фешбах «Методы теоретической физики», т. 1 (ИЛ, 1958) и многие другие.

В некоторых случаях стереоскопические чертежи и рисунки проектируемых или реконструируемых строительных сооружений могут заменять дорогостоящие и трудновыполнимые макеты. Чертить и рисовать стереоскопические изображения простых геометрических фигур нетрудно, но изготовлять стереоскопические изображения сложных сооружений и конструкций затруднительно. Для облегчения этой работы могут применяться специальные рисовальные приборы и стереографы. В последнее время предложен и разработан ряд таких оригинальных приборов и аппаратов. В частности, оригинальный стереограф для одновременного вычерчивания или рисования двух парных чертежей или рисунков какого-либо сложного сооружения с соответствующими параллаксами между одноименными точками стереопары предложил Д. О. Шварцман. Оригинальную аппаратуру для рисования и вычерчивания стереоскопических изображений сложных объектов разработал проф. С. С. Брюхоненко совместно с научными сотрудниками П. Д. Скворцовым и Р. В. Нуринской. Ими же рассчитана и разработана методика выполнения на данной аппаратуре стереоскопических чертежей и рисунков.

Изготовленный при помощи приборов стереоскопический чертеж или рисунок правильно и наглядно передает пространственные формы и геометрические размеры изучаемого объекта. Для дорисовки стереоскопических кинофильмов и съемки стереоскопических мультипликационных кинофильмов применяется разработанный по предложению А. Г. Болтянского и Н. А. Овсянниковой специальный рисовальный прибор — стереопантограф.

Стереоскопические чертежи и рисунки, например приведенные на листе XXXIII, хорошее подспорье в работе архитектора и скульптора при проектировании зданий, архитектурных сооружений и памятников. При помощи их архитектор, скульптор, строитель могут увидеть в объемной форме задуманные ими сооружения еще до их постройки. С другой стороны, уже разрушенные архитектурные памятники можно представить себе в пространственном виде по их нарисованным стереоскопическим перспективам. Примером восстановления такой стереоскопической перспективы может служить стереоскопический рисунок церкви Николы на Липке, сделанный в Академии архитектуры и строительства СССР инженером А. К. Клементьевым. Здание существовало с 1292 г. до ее разрушения фашистскими захватчиками в войну 1941—1945 гг.

Для рассматривания полученных графическим способом стереоскопических изображений применяются специальные конструкции зеркальных стереоскопов или используется анаглифический способ проекции. Анаглифический метод воспроизведения рисованных стереоскопических изображений обычно применяется при использовании таких изображений в качестве наглядных пособий.

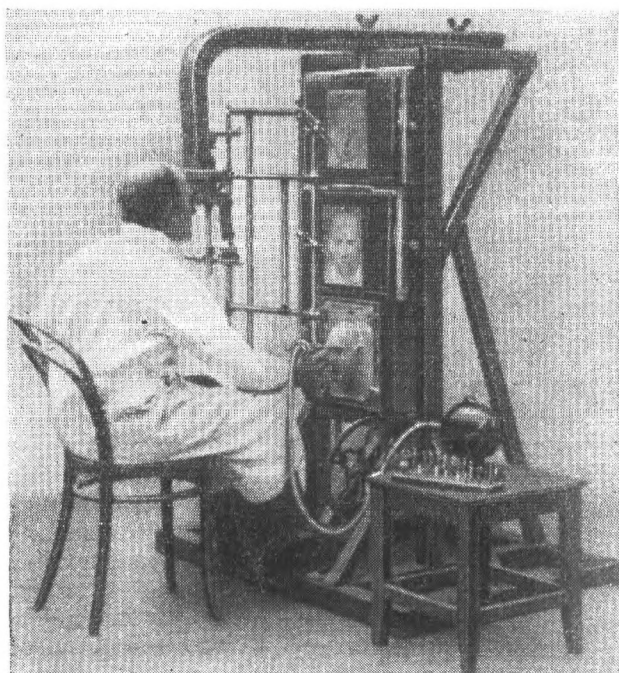
§ 2. ПРИНЦИПЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОСКУЛЬПТУРЫ И ФОТОРЕЛЬЕФА

По стереоскопическим фотографиям человека или любого другого объекта скульптор в принципе может, пользуясь стереофотограмметрическими приборами, воссоздавать пространственную оптическую модель данного объекта. С этой стереоскопической моделью объекта, как мы знаем, легко может быть совмещена пространственно реальная марка. Если в пространство, где наблюдается стереоскопическая модель, поместить кусок какого-либо материала (например, дерево или мрамор), а вместо марки взять соответствующий инструмент для обработки данного материала, то, перемещая этот инструмент по контуру стереоскопической модели, можно снимать слои материала до совмещения обрабатываемой поверхности с поверхностью стереоскопической модели. Таким образом из куска данного материала можно механически создать фотоскульптуру, которая будет представлять собой материальную пространственную копию данного объекта.

Для производства такого рода работ конструировалась специальная аппаратура. Одна из простейших конструкций такой аппаратуры представлена на рис. 209. В этой конструкции два фотографических изображения, составляющие стереопару и расположенные одно под другим, наблюдаются скульптором через бинокулярное оптическое устройство в виде стереомодели, пространственно находящейся под изображением стереопары. Это же пространство скульптор видит в бинокулярном оптическом устройстве непосредственно через полупрозрачные зеркала. Помещая в это пространство материал, скульптор увидит его «полупрозрачным» и пронизанным как бы изображением стереоскопической модели. Наблюдая за контурами стереоскопической модели, скульптор при помощи электроинструмента может сравнительно легко создать ее копию из материала.

Чтобы изготовленная скульптура была точной копией натурального объекта, необходимо, конечно, чтобы все пространственные соотношения стереоскопической модели повторяли геометрически подобную пространственную форму объекта. Такое геометрическое подобие достигается при ортоморфическом воспроизведении стереоскопического пространства данной оптической системой, когда наблюдается одинаковый масштаб геометрических размеров модели во всех трех измерениях и соблюдается полное соответствие всех угловых размеров модели и объекта. Однако не во всех случаях скульптурного воспроизведения объекта бывает необходима пространственная ортоморфичность произведения с оригиналом. Так, на-

пример, при изображении предмета в виде барельефа масштаб воспроизведения глубины, естественно, должен быть меньше, чем масштаб воспроизведения фронтальной поверхности объекта. Необходимое регулирование масштабных соответствий стереоскопической модели легко может быть выполнено примерно теми же оптическими средствами, что и в стереофотограмметрической аппаратуре.



Гис. 209. Изготовление скульптуры по стереоскопической модели

Чтобы автоматизировать процесс фотографического изготовления скульптуры, предлагались различного рода фотоэлектрические устройства, соединенные с исполнительным механизмом, приводящим в действие режущий инструмент, в качестве которого обычно рекомендуется фреза. Способ автоматического фрезерования сложной формы деталей по копиру не является чем-то необычным. Вся трудность проблемы автоматического изготовления фотоскульптуры состоит главным образом в изготовлении управляющих фотокопиров для работы такого станка. Простой пары сопряженных стереоизображений для фотоэлектрического управления станком недостаточно. Автоматический поиск соответственных точек на сопряженных изображениях стереограммы пока может делать только человек. Поэтому, чтобы облегчить механический поиск сопряженных точек на изображениях стереограммы, предлагается при фотографировании стереограммы производить освещение объекта проекцией на объект светящейся координатной сетки. Выбрав наиболее удобную форму координатной сетки, возможно, удастся решить вопрос автоматического чтения стереограммы (при помощи фотоэлементов) и автоматической переработки информации о пространственных параллаксах, содержащихся в стереограмме, для выдачи управляющих сигналов на автоматически действующий фрезерный или другого рода станок. Пока таких станков, автоматически управляемых от стереограммы, нет.

Единственно реально опробованным способом автоматического изготовления рельефных изображений пока является фотографический спо-

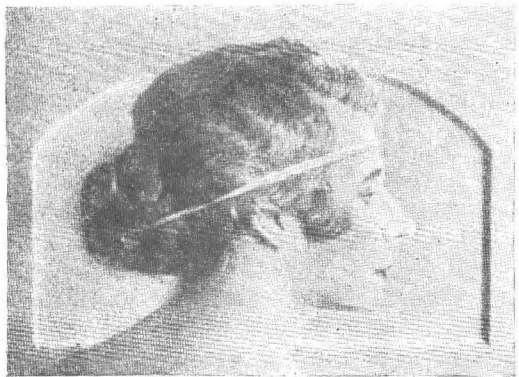
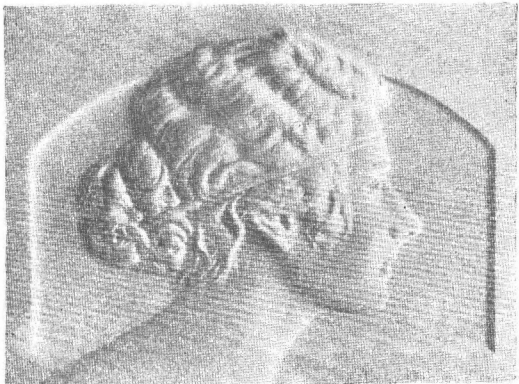
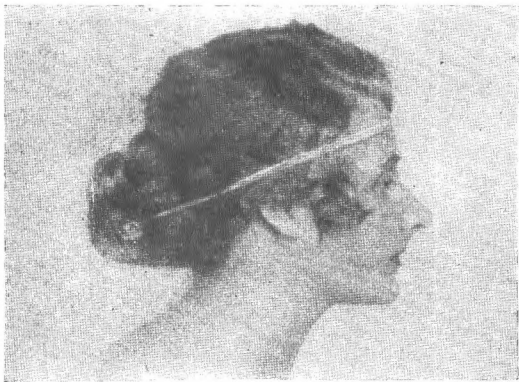


Рис. 240. Фоторельеф, полученный на хромированной желатине

соб получения рельефа на светочувствительных слоях хромированной желатины. Он не может претендовать на точное воспроизведение рельефа оригинала. В этом отношении вряд ли можно получить даже какую-либо закономерную пропорциональность между пространственными формами объекта и воспроизводимой глубиной рельефа на копии. Тем не менее этот прием нередко использовался в прикладном искусстве для получения декоративных рельефных изображений, называемых «фоторельефом», «фотопластикой», «псевдопластикой» и т. п.

Сущность процесса такого изготовления рельефа сводится к следующему. Первоначально готовится толстый слой хромированной желатины. Для этого набухшую в воде желатину расплавляют, подогревая до температуры не выше 60° , и добавляют в ее расплав около 6% двуххромовокислого аммония или двуххромовокислого калия. Приготовленный таким образом расплав выливают в плоскую кювету или на стеклянную пластинку и дают ему застыть и высохнуть, держа его при этом в темноте. В результате получается толстый слой хромированной желатины, обладающий светочувствительностью, на который можно контактным или проекционным путем печатать фотографическое изображение. Хромированная желатина под действием света задубляется и делается нерастворимой в горячей воде. Поэтому те участки слоя хромированной

желатины, на которые печатаются более светлые детали изображения, сильнее задубятся, чем участки, на которые печатаются более темные детали изображения. После проведения необходимого экспонирования (обычно довольно длительного) на слое хромированной желатины получают отпечаток фотографического изображения в виде различных градаций задубленности хромированной желатины. Отпечаток проявляется путем промывки желатинового слоя теплой водой. В теплой воде незадубленная желатина растворяется и вымывается. На пленке или в кювете остаются только участки задубленной желатины в виде рельефа, высота которого воспроизводит яркость деталей фотографического изображения.

В зависимости от того, что печатается на хромированную желатину, фотографический негатив или позитив, получают прямой или обратный рельеф изображения. С полученного рельефного изображения можно снимать гипсовые или иные формы, по которым легко выдавливаются из фольги или из папье-маше оттиски рельефных копий.

На рис. 210 представлены последовательные стадии изготовления рельефной фотографии. На верхнем рисунке показана фотография, с которой снималась рельефная копия; на среднем — изображена гипсовая форма, полученная с желатинового рельефного изображения, и, наконец, на нижнем рисунке показан готовый оттиск рельефного фотографического отпечатка, выданного на гипсовой форме.

Успех изготовления рельефных изображений на слоях светочувствительной хромированной желатины фотографическим путем всецело зависит от удачно выбранного освещения объекта при его фотографировании. Только соответствующим освещением объекта можно получить такой фотоснимок, по которому будет воспроизведено задублинной желатиной изображение с естественной передачей рельефа.

§ 3. РИСОВАНИЕ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Получение стереограммы какого-либо предмета сводится к созданию двух перспективных изображений, нарисованных из двух точек зрения, расстояние между которыми составляет нормальный стереобазис. Такие изображения могут быть выполнены, как мы видели, либо путем фотографирования предмета, либо путем рисования его двух изображений в соответствии с законами перспективного построения из соответствующих двух центров перспективы. Различие перспектив изображений, видимых правым и левым глазом художники заметили очень давно. Об этом имел представление еще Леонардо да Винчи. Поэтому не удивительно, что рисованная стереограмма в виде двух изображений, наблюдаемых правым и левым глазом, была выполнена задолго до открытия фотографии и почти за 100 лет до изобретения стереоскопов.

Рисование стереограммы с натуры. Рисование данного предмета с натуры — наиболее простой способ выполнения стереоскопического рисунка. Но для этого необходимо точно наблюдать рисуемый предмет из тех точек пространства, которые соответствуют выбранным центрам перспективы.

Для выполнения такого рисунка были предложены различные приспособления; примером одного из них может служить ширма с двумя маленькими отверстиями, разделенными промежутком в 65 мм по горизонтам (рис. 211). Каждое из этих отверстий служит для наблюдения рисуемого предмета с точки зрения правого и левого глаза. Художник, рисуя одно изображение стереограммы с предмета, должен наблюдать предмет через одно отверстие, а рисуя другое — через другое отверстие. Таким образом может быть получено два рисованных изображения, соответствующих сопряженным изображениям стереограммы. Чтобы можно было впоследствии наблюдать эти изображения в виде стереоскопической картины, необходимо, чтобы масштабы обоих изображений были одинаковыми.

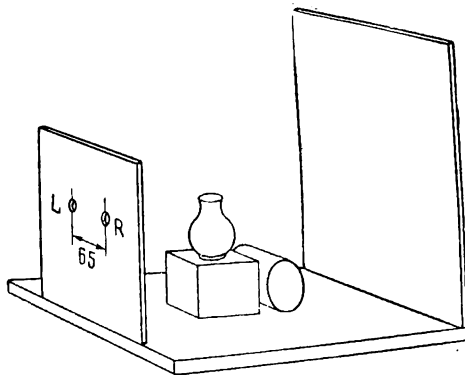


Рис. 211. Простейшее приспособление для рисования стереограммы

Можно указать еще на один метод выполнения рисованных стереограмм с натуры. Этот метод заключается в том, что после первого сопряженного изображения стереограммы рисуемый предмет поворачивается на небольшой угол, соответствующий изменению ракурса при перемене точки зрения художника на 65 мм по горизонтали. С повернутого предмета делается зарисовка второго изображения стереограммы. Вместо поворота объекта вокруг оси можно смещать точку наблюдения вокруг этого объекта. Здесь мы указали на возможности рисования с натуры сопряженных изображений стереограммы под контролем наблюдения естественных объектов. Однако рисование стереограммы может быть выполнено и чисто графическими методами без наблюдения натуры.

Рисование силуэтных стереограмм. Стереоскопические пары силуэтных рисунков могут быть изготовлены крайне простыми средствами. Так, например, для изготовления стереоскопической пары изображений по имеющемуся силуэтному рисунку С. С. Гуревич предложил такой способ. Исполненный черной тушью на белой бумаге силуэтный рисунок репродуцируют и с полученного негатива печатают на контрастной фотобумаге несколько фотокопий одинакового масштаба. Из одной или двух фотокопий вырезают тонкими ножницами по контуру отдельные детали силуэтного изображения: фигуры людей, животных, деревья, звезды и т. д. Затем из двух других отпечатков составляют основу стереограммы, считая один из отпечатков за правое, другой за левое сопряженные изображения. На эти отпечатки наклеивают вырезанные детали, размещая их так, чтобы они находились на одинаковом уровне по высоте с такими же деталями, изображенными на отпечатке, но были несколько сдвинуты вправо или влево от этих деталей. Наклеивая одну и ту же деталь на левом изображении вправо, а на правом изображении влево от соответствующих деталей, изображенных на фотоотпечатках, можно получить при стереоскопическом рассматривании отпечатков впечатление выдвижения этой детали вперед. Наклеивая деталь на левом отпечатке влево, а на правом вправо от соответствующих деталей изображения, можно получить стереоскопический эффект пространственного отодвигания этой детали назад. Чем больший будет сдвиг, тем на большее расстояние вперед или назад отодвинется данная деталь при рассматривании. Несдвигаемые детали изображения на правом и левом изображении образуют план, совпадающий при рассматривании с плоскостью отпечатка.

После окончания наклейки деталей на обоих изображениях при стереоскопическом рассматривании стереограммы окажутся заметными лишние дублирующие детали плоскостного рисунка. Эти лишние детали на фотоотпечатках необходимо тщательно забелить или вытравить. Составленные вместе сопряженные изображения рекомендуется вновь отрепродуцировать и отпечатать на бумаге в виде законченной стереограммы. Изготовленные таким образом образцы силуэтных стереограмм приведены на листе XXXV.

Силуэтные стереограммы можно составлять из нескольких равноудаленных планов, рисуя силуэты каждого плана на прозрачном материале, например на целлулоиде. Стереограмма каждого плана составляется из двух идентичных силуэтных изображений. При этом расстояние между соответствующими изображениями в стереограмме берется тем меньше, чем ближе в пространственном изображении этот план должен воспроизводиться. Окончательная стереограмма получается фотографическим репродуцированием составного изображения из сложенных вместе прозрачных стереограмм отдельных планов.

Силуэтные стереоскопические рисунки, вероятно, должны быть особенно интересны для иллюстрирования детских сказок, басен, рассказов, занимательных книг и т. п.

§ 4. ГРАФИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ СТЕРЕОГРАММ

Сравнительно просто, путем вычерчивания правого и левого сопряженных изображений, могут быть построены стереограммы правильных геометрических тел. Сопряженные изображения рисуются по законам проективной геометрии в виде двух картин, получаемых центральной проекцией при наблюдении предмета с точки зрения правого и с точки зрения левого глаза. В главе I мы рассмотрели основные закономерности построения таких центральных проекций. На рис. 33 было показано построение центральной проекции куба, а на рис. 34 построение на картинной плоскости перспективного изображения произвольно выбранной прямой линии. Более сложное построение центральной проекции с распределением теней было показано на рис. 37.

Аналогично тому, как строится одна центральная проекция предмета, может быть выполнено построение двух центральных проекций, образующих на картинной плоскости стереограмму. Только при построении двух центральных проекций, образующих стереограмму, надо иметь в виду соблюдение правильного выбора центров проекций для каждого из изображений, чтобы обеспечить естественную передачу глубины пространства и удобство наблюдения стереоскопической картины. Для этого, если стереограмма строится в натуральном масштабе, в каком она будет и рассматриваться, необходимо, чтобы расстояние между центрами проекции каждого изображения было 65 мм. При этом необходимо, чтобы эти центры располагались на одной горизонтали параллельно картинной плоскости и на расстоянии, на каком относительно этой плоскости будет находиться лицо, рассматривающее стереограмму.

В случае, если стереограмма строится в увеличенном или уменьшенном масштабе по сравнению с тем, в каком она будет рассматриваться, или же она предназначена для рассматривания с большого расстояния, для соблюдения геометрического подобия стереоскопической модели с пространственной формой воспроизводимого объекта необходимо соответствующим образом при построении центральных проекций обоих изображений увеличивать или уменьшать расстояние между центрами проекции и их удаленностью от картинной плоскости.

При графическом выполнении стереограммы оба сопряженных изображения, правое и левое, могут быть нарисованы либо на одном общем картинной плоскости, либо на двух рядом расположенных полях. На рис. 212 приведен пример построения совмещенного расположения обоих сопряженных изображений стереограмм на одном поле. Здесь четырехгранная пирамида лежит своим основанием $BCDE$ на картинной плоскости, поэтому обе ее центральные проекции совпадают. Вершина же пирамиды A , лежащая за картинной плоскостью, представляется на каждой проекции своей точкой $A_{\text{п}}$ — для правого сопряженного изображения и $A_{\text{л}}$ — для левого сопряженного изображения. Обе проекции точки A лежат на одной горизонтали, разделенные линейным параллаксом p , который, как нетрудно видеть из построения чертежа, определяется величиной

$$p = \frac{bh}{D-h},$$

где b — базис между центрами проекций; h — глубина расположения точки A за картинной плоскостью; D — удаленность точки A от центров проекции. Соединяя полученные на чертеже точки $A_{\text{п}}$ и $A_{\text{л}}$ с вершинами основания B , C , D и E , получаем два сопряженных изображения пирамиды, предназначенные для рассматривания правым и левым глазом.

Такое построение совмещенных на одном поле сопряженных изображений стереограммы особенно удобно при анаглифическом способе наблюдения стереоскопического изображения. Вычерчивая правую централь-

ную проекцию красным карандашом, а левую центральную проекцию голубым карандашом (или тушью), можно сразу получить анаглифический рисунок, представляющий пространственным при рассматривании его через анаглифические очки с бирюзовым светофильтром для правого глаза и красным светофильтром для левого глаза. Вычерчивание стереограмм с размещением сопряженных изображений на двух отдельных полях

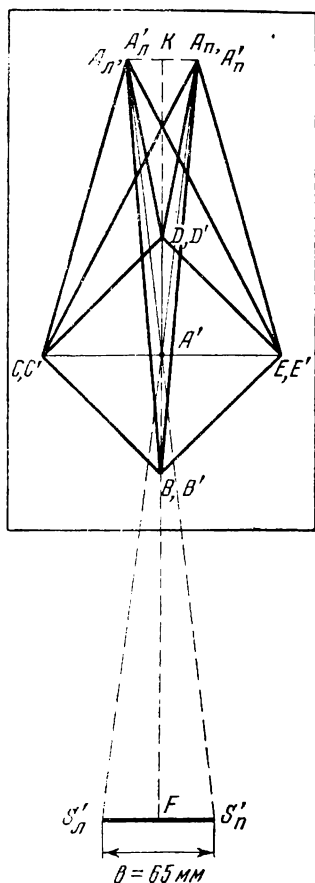


Рис. 212. Графическое построение совмещенной стереограммы

картинной плоскости может быть выполнено следующим образом. На листе бумаги, как показано на рис. 213, обводятся рамками два поля для вычерчивания на них соответственно правого и левого сопряженных изображений стереограммы. Расстояние между центрами этих полей берется немного большим межзрачкового расстояния, чтобы вычерчиваемые центральные проекции предмета изобразились по середине этих полей.

Через оба поля проводится прямая линия горизонта HH . На этой линии на правом и левом полях отмечаются точки P схода прямых, идущих в пространстве перпендикулярно к картинной плоскости. Расстояние между этими точками P берется большим межзрачкового базиса на величину

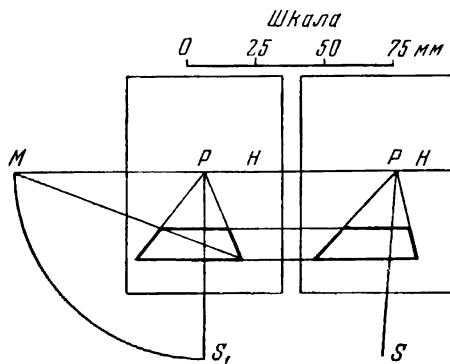


Рис. 213. Графическое построение стереограммы на двух отдельных полях

ну допустимого параллакса P_0 для данных условий рассматривания стереограммы. Величина $H = b + P_0$ обычно заключается в пределах от 70 до 90 мм. При помощи вспомогательного построения, показанного на рисунке, рисуется в плане перспектива одного и того же изображения на обоих полях, причем параллельная прямая, идущая вдоль горизонта на обоих полях, остается параллельной также линии горизонта, а параллельные линии, идущие к горизонту, в перспективе изображаются в виде лучей, исходящих из точек схода правого и левого изображений.

Для построения масштаба глубины на картинной плоскости надо иметь в виду, что проекции прямых, лежащих в горизонтальных плоскостях и идущих под углом 45° к картинной плоскости, сходятся на линии горизонта в точке расстояний M , удаленной на величину d от точки схода P , равную расстоянию от центра проекции S , соответствующего изображению до картинной плоскости.

Пользуясь отмеченными выше свойствами центрального проектирования, можно показать на примере рис. 213, как должны вычерчиваться две центральные проекции квадрата, лежащего в горизонтальной плоскости, т. е. в плоскости, перпендикулярной картинной плоскости стереограммы. Если передняя, ближняя к нам, сторона квадрата параллельна картинной плоскости, то она изобразится на обоих полях отрезком прямой, параллельной линии горизонта. Боковые стороны квадрата, перпендикулярные картинной плоскости, будут иметь направление от концов отрезка, изображающего переднюю сторону квадрата, в виде лучей, направленных на каждом поле картинной плоскости к своим точкам схода P . Длину отрезков, изображающих стороны, уходящие в глубину, можно определить, построив на одной из проекций диагональ этого квадрата. Такое построение выполнено на левом поле. Отрезок PS_1 , изображающий расстояние от картинной плоскости до левого центра проекции, развернут вокруг точки P до совмещения его с линией горизонта. На линии горизонта найдена точка расстояний M , в которой должны сходиться изображаемые на левом поле все горизонтальные прямые, имеющие наклон в 45° к картинной плоскости. Одной из таких прямых должна быть диагональ нашего квадрата. Проводим от правого переднего угла квадрата на левом поле картинной плоскости прямую, идущую к точке M . Очевидно, отрезок этой прямой до пересечения его с другим лучом и будет диагональю нашего квадрата, поскольку он лежит в плоскости квадрата и идет под углом 45° к передней стороне его. Дальняя сторона квадрата также расположена фронтально, т. е. параллельно картинной плоскости, и поэтому ее след на картинной плоскости изобразится отрезком прямой, параллельным линии горизонта и идущим между двумя лучами, образующими боковые стороны квадрата от точки пересечения левой боковой стороны с диагональю.

На правом поле стереограммы нет необходимости производить все приведенные построения. Можно заметить, что фронтальные прямые, лежащие в горизонтальной плоскости, на обоих полях картинной плоскости должны отображаться прямыми, параллельными линии горизонта и одинаково от нее удаленными. Поэтому на правом поле дальняя сторона квадрата строится продолжением прямой, изображающей эту сторону квадрата на левой центральной проекции. Отрезок этой прямой между лучами, изображающими боковые стороны квадрата на правом поле, и будет изображать на этой проекции дальнюю сторону квадрата. Пользуясь перспективными изображениями квадрата, можно построить сопряженные центральные проекции более сложных пространственных тел.

Для облегчения построений такого рода центральных проекций предложены различные вспомогательные приемы. Одним из довольно удачных приемов является координатный метод центрального проектирования, разработанный Г. А. Владимирским. В этом методе для построения сопряженных изображений стереограммы используется вспомогательная стереоскопическая координатная сетка. Все пространство, отображаемое на стереограмме, рассматривается в виде одного октанта системы прямоугольных координат. На двух ортогональных плоскостях, нормальных к картинной плоскости, строится методом, аналогичным только что описанному, пространственная масштабная сетка, изображенная на рис. 214. Для построения этой пространственной сетки расстояние между точками схода правого и левого изображений также принимается равным

$$H = b + P_0.$$

Положение точки расстояний B на линии горизонта определяет направление диагонали квадрата нижнего основания координатной сетки. Все построение центральной проекции выполнено для правого изображения, а по нему составлена координатная сетка левого изображения. Расстояние d между точкой схода правого изображения $F_{\text{прав}}$ и точкой расстояний

для этой проекции $B_{\text{прав}}$ выбирается равным расстоянию картинной плоскости от центров проекции, т. е. от тех точек, из которых данная стереограмма будет рассматриваться.

Пользуясь этими координатными сетками, можно строить совершенно независимо в двух координатных системах две центральные проекции одного и того же предмета, как это показано на рис. 215. Построенные таким образом изображения будут сопряженными изображениями стереограммы.

В случае необходимости сопроводить построенные на стереограмме фигуры буквенными обозначениями следует ставить буквы на обоих сопряженных изображениях. Каждая пара букв, обозначающих одноименные точки фигуры, должна быть расположена на одной горизонтальной прямой, а расстояние между буквами должно равняться расстоянию между одноименными точками изображения. В этом случае буквы будут казаться стереоскопически расположенными в пространстве на одной и той же глубине с обозначаемыми ими точками фигуры.

Как мы видим, графическое решение задачи построения двух центральных проекций, составляющих нормальную стереограмму, не всегда может быть легко выполнено. В некоторых случаях значительно проще рассчитать линейные параллаксы для соответствующих точек сопряженных изображений и по этим точкам нарисовать стереограмму. По законам перспективы для этого необходимо строить два изображения, учитывая, что на каждом из парных изображений центр перспективы несколько смещен по горизонтали, в результате чего получается параллактический сдвиг соответствующих точек предмета на первом изображении по отношению ко второму.

Имея одно из перспективных изображений предмета, путем графического построения можно нарисовать дополнительно к нему частичное изображение стереограммы, воспользовавшись приведенным выше методом и используя принцип параллактических сдвигов соответствующих точек на рисуемом изображении. Другим методом графического выполнения стереограммы может служить прием искусственного построения обоих изображений, который показан на рис. 216. Мы поясним этот метод графического построения стереограммы для случая простейшего объекта, которым являются два цилиндра, изображенные на рисунке.

Графическое построение стереограммы выполняется следующим образом. В плане рисуется положение изображаемых предметов, и на соответствующем удалении, с которого должно производиться их наблюдение, отмечаются две точки: L и R , разделенные промежутком в 65 мм. Эти точки соединяются прямыми с контурами предметов, как показано на рисунке. На некотором удалении за точками L и R проводится прямая XY , параллельная базису между точками L и R . На эту прямую проектируются лучи, идущие от контуров предмета через центры перспективы, пересекающие на прямой в виде отрезков соответствующие изображения рассмат-

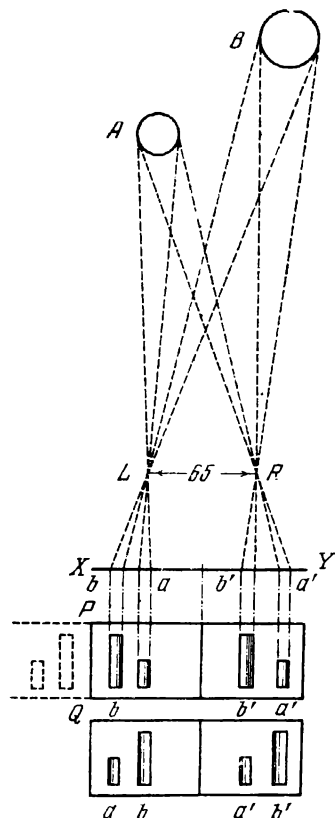


Рис. 216. Схема графического построения стереограммы

риваемых предметов. Изображению предмета A соответствуют два отрезка a и a' , предмету B — два отрезка b и b' . Эти отрезки позволяют определить взаимное расположение изображения предметов на стереограмме. Частичное изображение стереограммы строится по этим отрезкам, как показано на приводимом рисунке, причем построение изображений выполняется по горизонтали в соответствии с шириной и взаимным расположением отрезков на оси XU , а по высоте — в соответствии с полученным масштабом изображения для каждого предмета.

Построенные таким образом два частичных изображения стереограммы оказываются перевернутыми, а именно, при действительном расположении предметов мы видим большой цилиндр справа от малого цилиндра, на изображениях же стереограммы получается обратное расположение: малый цилиндр оказывается справа от большого. Чтобы можно было рассматривать такую стереограмму нормально, необходимо каждое из частичных изображений ее зеркально перевернуть, что можно сделать, например, путем поворота каждого из частичных изображений вокруг оси PQ и $P'Q'$. Перевернутые таким образом изображения соединяются вместе, как показано на нижнем рисунке, и образуют нормальную стереограмму, на которой правое изображение соответствует изображению, видимому правым глазом из точки R , и левое соответствует изображению предмета, видимому левым глазом из точки L .

Такое выполнение стереограммы очень кропотливо и может быть осуществлено только для простейших фигур с достаточной ясностью. Графическое выполнение стереограммы более сложных объектов представляет значительные затруднения.

§ 5. МЕХАНИЧЕСКОЕ РИСОВАНИЕ СТЕРЕОГРАММ

Трудность двукратного центрального проектирования при рисовании сопряженных изображений стереограммы привела к мысли об изготовлении аппаратов, позволяющих механически воспроизводить дополнительное сопряженное изображение к имеющемуся плоскостному рисунку с внесением необходимых параллактических сдвигов в положение отдельных фигур для соответствующего их пространственного расположения в стереоскопической картине. Принцип построения таких аппаратов основывается на использовании различных шарнирных механизмов. Большинство из предложенных для этой цели конструкций основывается на применении пантографического механизма для перечерчивания рисунка и механизма параллактических сдвигов перечерчиваемого изображения для создания соответственных горизонтальных параллаксов рисуемого плана. Параллактические сдвиги при перечерчивании изображений пантографом могут производиться либо соответствующим перемещением каретки с закрепленным на ней рисунком, либо соответствующими смещениями полюса пантографического механизма.

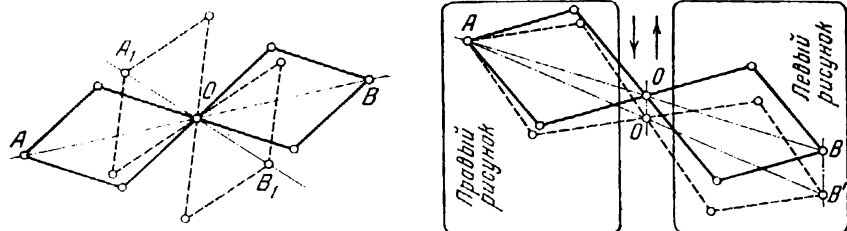
На рис. 217 представлена одна из возможных схем осуществления такого пантографического механизма со смещаемым центром закрепления. Этот механизм, составленный из двух шарнирных параллелограммов с фиксируемым плюсом O — центром вращения двух средних рычагов, — позволяет воспроизводить с помощью рисующего карандаша B точную копию оригинального рисунка, обводимого штифтом A . При равенстве сторон параллелограммов получаемый масштаб копируемого изображения будет равен $1 : 1$.

Легко можно представить, что параллактические сдвиги рисуемого изображения можно производить, отодвигая или приближая перерисовываемый рисунок вдоль линии, изображающей на рисунке горизонт. Нарисовав все предметы, лежащие в одном плане, раздвигают рисунки

для изображения предметов, расположенных в более удаленном плане, или сближают рисунки, рисуя предметы более ближнего плана.

Вместо раздвижения рисунков для изменения параллакса можно перемещать полюс пантографа O в направлении, параллельном направлению горизонта, изображенного на рисунках. В этом случае при перемещении полюса в направлении, показанном стрелочками, рисующий карандаш перемещается параллельно сдвигу полюса, но на удвоенное расстояние.

Известны и другого рода стереорисовальные приборы. Конструктивное выполнение одного из приборов для рисования стереоскопических изображений изображено на рис. 218. Верхний рисунок представляет



ис. 217. Принципиальная схема пантографического механизма для рисования стереограммы

вертикальный разрез прибора, а нижний — вид прибора в плане. Система выполнена в виде двух шарнирно связанных между собой расположенных в вертикальной плоскости рычагов. Один из рычагов жестко скреплен с первым ползунком, второй рычаг одним концом ведет второй ползунк, а другим концом упирается в наклонную плоскость, устанавливаемую параллельно плоскости рисуемых предметов. Наклонная плоскость снабжена воронкой и удерживается в шаровом шарнире, расположенном на перемещаемом по вертикали стержне. Для стереоскопического наблюдения рисуемой стереограммы прибор снабжен липзовым стереоскопом (1, 2).

При рисовании стереограммы художник одной рукой держит стержень 3, шарнирно соединенный с одним из ползунков, и, перемещая его, тем самым перемещает карандаш 4. Другой рукой посредством воронки 5 он может поворачивать плоскость 6, устанавливая картинную плоскость под необходимым для зарисовки изображения углом. Затем, перемещая вертикально посредством стержня 7 плоскость 6, художник следит, чтобы стереоскопическое изображение марок, нанесенных на стеклянных ползунках 8 и 9, оказалось на соответствующем данному плану расстоянии. В этом положении производится зарисовка деталей изображения данного плана.

Очень несложный стереограф для одновременного рисования двух изображений стереограммы сконструирован Д. О. Шварцманом. Устройство этого прибора и его действие заключаются в следующем. На каретку прибора A (рис. 219) прикрепляется лист белой бумаги. Поверх этого листа накладывается копировальная бумага, а поверх нее — второй лист белой бумаги, который прикрепляется к неподвижным планкам вверху и внизу от каретки A . Клинообразный движок может передвигаться по вертикали в пределах 10 см, при этом смещая каретку вместе с нижним листом бумаги по горизонтали в пределах 1 см. Верхний лист бумаги B при этих передвижениях остается неподвижным. Таким образом, каждому положению нити d (соединенной с движком C) на шкале Δ соответствует определенный сдвиг нижнего рисунка относительно верхнего, т. е.

определенное параллактическое смещение ΔX , определяющее собой расстояние предмета от зрителя.

При получении рисунка художник сначала набрасывает план изображения картины в перспективе на листе *E*, считая верхний край листа за горизонт. Этому помогает шкала дальности Δ . После этого на листе *B* делается легкий набросок изображаемого предмета. Затем, начиная детальную прорисовку, художник каждый раз ставит движок *C* в такое положение, чтобы нить *d* проходила на листе *E* над изоб-

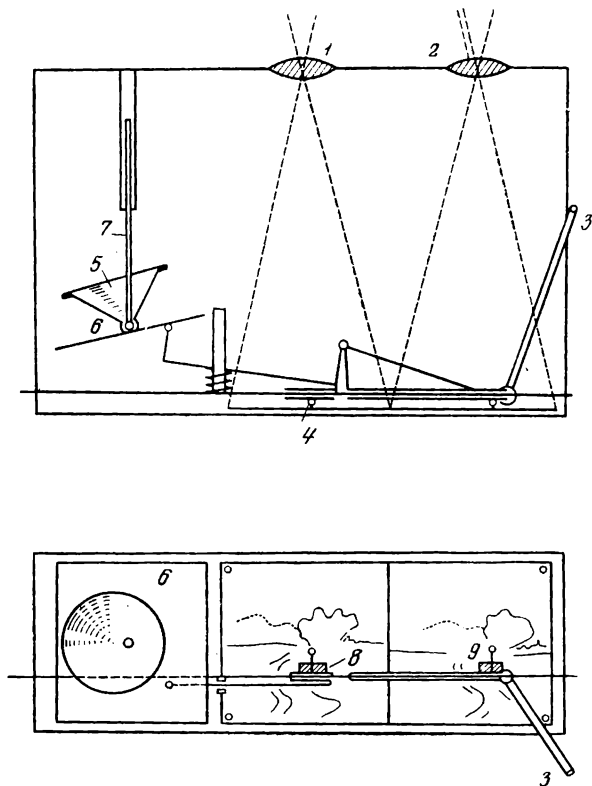


Рис. 218. Схема пантографа для рисования стереограмм

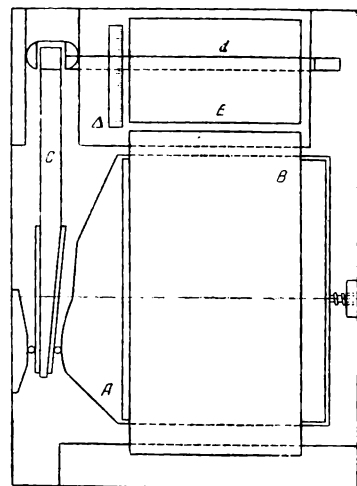


Рис. 219. Схема стереографа Д. О. Шварцмана

ражением той детали, которую художник в данный момент рисует на листе *B*.

При помощи такого несложного устройства можно получить сразу два рисунка, смещенные друг относительно друга на величину, дающую возможность один рисунок принимать за вид, наблюдаемый правым глазом, а другой — левым.

На листе XXXIII приведены образцы стереорисунков, выполненных при помощи такого рода рисовальных приборов.

§ 6. СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ ЖИВОПИСЬ

Появившийся растровый метод воспроизведения стереоскопических изображений открывает возможность для создания трехмерной объемной живописи. Первые попытки создать стереоживопись уже делались и ранее. Так, например, мы уже указывали на стереорисунки, выполнявшиеся Д. О. Шварцманом при помощи изобретенного им стереографа. Однако такие стереорисунки относятся к области графики, и к тому же они не позволяют без стереоскопа непосредственно наблюдать их пространственные изображения свободно многим зрителям. Только после фотографической съемки и изготовления стереоскопических фотографий на растровых

материалах можно рассматривать пространственные изображения свободно без стереоскопа.

Более заманчиво создание живописных картин, которые давали бы возможность зрителям непосредственно видеть в естественной расцветке пространственную стереоскопическую картину. Один из таких методов был предложен Б. Т. Ивановым. Трехмерную живопись он предложил выполнить разложением картинной плоскости на ряд вертикальных параллельных полосок, составляющих в совокупности ее основу. Эти полоски должны являться элементами параллакс-стереограммы, позволяющей воспринимать трехмерную живопись, непосредственно наблюдая изображение

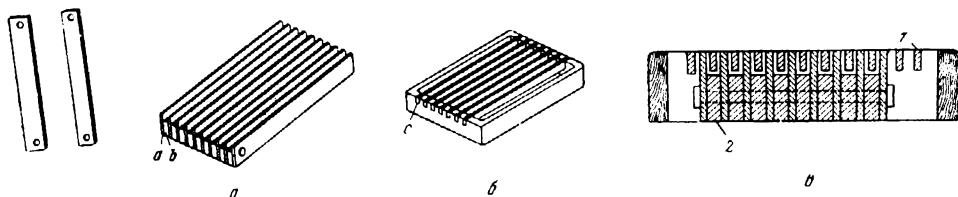


Рис. 220. Изготовление картинной плоскости для стереоживописи:

а — основа картинной плоскости для стереоживописи, собранная из пластинок; *б* — вторая половина ребристой поверхности; *в* — способ соединения двух ребристых решеток: 1 — решетка; 2 — ребристая плоскость

через растр, структура которого согласована с распределением элементов картины. Сам растр может состоять либо из цилиндрических, либо из конических линз, собранных в плоской поверхности.

Таким образом, для осуществления трехмерной живописи по этому предложению необходимо иметь картину, составленную из решетчатой основы и растра. По предложению Б. Т. Иванова, основа картинной плоскости для стереоживописи должна выполняться из ряда параллельных узких пластин, изображенных на рис. 220, *а*. Размеры ребер этих пластин и расстояний между пластинами должны устанавливаться в соответствии с разрешающей способностью глаза. Практически эти величины должны составлять около 1 мм. Для изготовления картинной плоскости рекомендуется следующий возможный способ. Из листового материала, например картона, фанеры, железа, целлулоида и т. п., нарезаются пластинки заданной толщины. При помощи клея и металлических стержней, как показано на рис. 220, *а*, пластинки собираются в одну ребристую поверхность. Другие плоскости собираются таким же способом в решетки несколько другой конструкции (рис. 220, *б*). Обе решетки могут соединяться одна с другой таким образом, чтобы ребра одной решетки оказались между ребрами другой, как показано на рис. 220, *в*.

При изготовлении таких ребристых решеток, составляющих картинную плоскость, надо соблюдать достаточно большие точности, а именно: ребра полосок, составляющие картинную плоскость, должны быть подогнаны или подшпигтованы так, чтобы отклонения от плоскости не превышали $0,1 + 0,2$ мм на 1 м длины этой плоскости. Кроме того, необходимо соблюдать равномерность шага ребер в этих решетках. Допустимы отклонения шага не более 5—10%.

Другой способ изготовления картинной плоскости осуществляется путем выполнения ребристой поверхности из проволоки. Такая ребристая поверхность может быть изготовлена намоткой двух проволок на стекло или деревянный щит размером в намеченную картину. Перед намоткой проволоки лицевая поверхность щитка должна покрываться клейким веществом, при высыхании которого одна из проволок отматывается и, таким образом, между проволоками получается свободный промежуток.

Изготовление решетки из проволоки для основы картинной плоскости такое же, как было описано выше. Проволочная решетка укладывается в промежутки между проволоками ребристой пластины и должна иметь поверхность, к которой хорошо приставала бы краска.

Для изготовления стереоскопической картины художник должен нарисовать два изображения одного и того же объекта на двух ребристых пластинах таким образом, чтобы на одной ребристой плоскости было нарисовано изображение, которое должен видеть правый глаз зрителя, а на ребристой пластине — изображение, предназначенное для наблюдения левым глазом. Когда два таких изображения исполнены, то обе ребристые пластины укладываются в одну общую решетку, причем для расположения пространственной картины на той или иной глубине необходимо иметь соответствующий сдвиг одного изображения по отношению к другому. Например, для удаления воспроизводимого на картине объекта в бесконечность этот сдвиг для одноименных точек изображения должен быть равен среднему межзрачковому расстоянию. Таким образом, при желании скомпоновать рисунок в пространстве между плоскостью картины и бесконечностью необходимо производить сдвиги левого изображения по отношению к правому от 0 до 65 мм. Путем передвижения одного изображения по отношению к другому, например, таким образом, чтобы четный элемент правого изображения расположился рядом с нечетным элементом левого изображения, начиная от 1 до 65, может быть выполнено указанное выше условие. В частном случае, когда элемент 2 будет находиться рядом с элементом 1, изображение представится зрителю находящимся в плоскости картины. Чтобы выдвинуть изображение из плоскости картины вперед к зрителю, необходимо произвести одновременное передвижение всех элементов одного изображения по отношению к другому.

После компоновки картинной плоскости необходимо перед ней расположить растр таким образом, чтобы элементы его находились друг от друга на таком же расстоянии, как элементы первой или второй решетки, причем направление линиатур этих элементов должно совпадать с направлением ребристых полос картинной плоскости. Когда все элементы картины собраны, как здесь было указано, то изображение картины с соответствующей точки зрения может наблюдаться зрителями в виде стереоскопической картины, соответствующие параллаксы отдельных деталей которой будут создавать иллюзию расположения этих деталей на различных расстояниях от зрителя.

Кроме описанных здесь методов изготовления стереоскопических рисунков, предложенных Д. О. Шварцманом, и стереоскопических картин, предложенных Б. Т. Ивановым, известны и другие попытки изготовления стереоскопических рисунков, наблюдаемых зрителем без очков. В этом направлении проводились работы С. П. Ивановым, Д. И. Фроловским и другими.

§ 7. ИСКУССТВЕННЫЕ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЕ ИЛЛЮЗИИ

Стереоскопический эффект при бинокулярном восприятии двух различных изображений позволяет создавать искусственно зрительные иллюзии, которые иногда используются в различного рода зрелищах и аттракционах. До появления стереокино в качестве аттракциона была известна стереоскопическая иллюзия под названием «чудеса теней». Иллюзорная стереоскопическая картина проектировалась на обычный полотняный экран. С противоположной стороны экрана (от зрителя) помещались два цветных фонаря; один освещал экран красным светом, другой зеленым, как это показано на рис. 221. Зритель снабжался цветными очками, у которых одно стекло было красным, другое зеленым. За экраном помещался какой-либо предмет, который было желательно показать

зрителям. Этот предмет давал на экране цветные тени — одну красную, другую зеленую. Через зеленые и красные стекла очков зритель мог видеть одним глазом одну тень предмета, другим глазом — другую. Пространственные сдвиги этих теней вызывали параллактические сдвиги видимых правым и левым глазом изображений. Эти сдвиги и создавали впечатление, что показываемый предмет будто бы находится «висящим» в воздухе перед экраном.

Так, если за экраном в точках P и Q , как показано на рисунке, помещались предметы, то от них на экранах образовывались тени в точках p и q . Зритель, наблюдая правым глазом зеленый свет, видел тени,

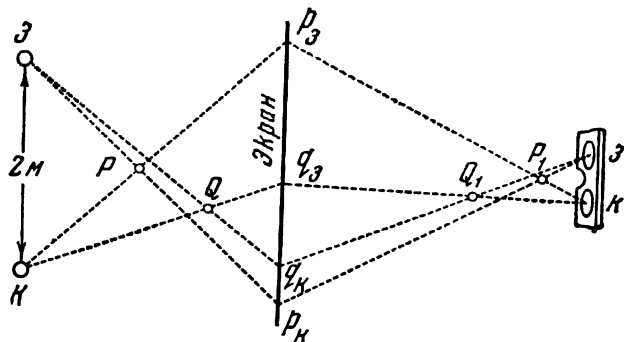


Рис. 221. Схема стереоскопической иллюзии «чудеса теней»

p_k и q_k , а другим глазом через красное стекло черными казались тени, p_a и q_a , окрашенные в красный свет. Таким образом зрителю один предмет представлялся в положении Q_1 , а другой предмет — в положении P_1 на пересечении зрительных осей, наблюдавших цветные тени от показываемых предметов. При осуществлении такой иллюзии оказывается, что при перемещении предмета за экраном к источнику света увеличивается тень на экране и этим создается иллюзия сдвига предмета от экрана к зрителю. Все, что зрителям кажется летящим на них с экрана, движется на самом деле в обратном направлении от экрана, к источникам света.

Вместо проекции при помощи цветных фонарей «чудеса теней» можно выполнить при освещении экрана поляризованным светом, только в этом случае экран должен обладать свойством не деполаризировать лучи света, а зритель должен снабжаться очками с поляризационными фильтрами. Само собой понятно, что для разделения лучей от правого и левого фонарей необходимо, чтобы плоскости поляризации пучков света от этих фонарей были взаимно-перпендикулярны, а поляризационные фильтры в очках у зрителя должны быть ориентированы также в соответствующих взаимно-перпендикулярных плоскостях. При использовании проекции с поляризованным светом в качестве предметов можно на экране проектировать силуэты прозрачных двулучепреломляющих пластинок (например, целлофан). Лучи поляризованного света, проходя через такие пластинки, претерпевают двулучепреломление, а проходя различную толщину пластинок, получают различный сдвиг фаз, благодаря чему, наблюдая через поляризационный фильтр тень на экране, зритель видит ее вследствие интерференции сдвинутых по фазе лучей окрашенной в тот или иной цвет. При помощи такого устройства можно получить крайне интересный эффект стереоскопической иллюзии — окрашенное в различные цвета пространственное изображение, которое для невооруженного глаза зрителя остается невидимым.

§ 8. СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ СКУЛЬПТУРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Одним из интересных решений задачи воспроизведения объемного изображения является проекция ограниченного интегрального изображения на цилиндрический растровый экран. При размещении проекционной установки внутри такого экрана можно воспроизвести на экране различные объемные изображения таких объектов, как скульптурные группы, фигуры и т. п. Воспроизводимые объекты могут представляться зрителям как полностью заключенными внутри цилиндра, ограниченного поверхностью экрана, так и с рельефом, частично выступающим за поверхность экрана.

Решение этой задачи возможно на основе применения цилиндрического линзово-растрового экрана, обеспечивающего для каждого зрителя, находящегося в любой точке зрительного зала, видение каждым глазом одного лишь единственного и при этом неискаженного изображения панорамограммы.

Для проекции изображений можно использовать один центральный проектор, снабженный оптической системой, развертывающей проецируемое изображение по всей поверхности экрана. Действие проекционной установки поясняется принципиальной оптической схемой проекции, изображенной на рис. 222. На этой схеме a, b представляет цилиндрическую поверхность экрана (в плане), составленную из отдельных стержневидных прозрачных элементов, образующих линзовый растр. Осью цилиндрической поверхности экрана является вертикальная прямая OO , след которой O показан на схеме. Центр проекции S смещен от осевой линии OO на величину r . Угол проекции aSb обеспечивает получение на экране изображения шириной ab . Линзово-растровая поверхность экрана эквивалентна одной большой цилиндрической линзе, изображенной на рис. 223, которая собирает весь пучок падающих лучей на вертикальную ось pp , след которой P лежит на продолжении прямой SP , являющейся биссектрисой угла aSb .

Зритель, находящийся в точке P (или на продолжении оси pp), очевидно, будет видеть все проецируемое изображение одновременно. Проекция изображения последовательно перемещается по всей окружности цилиндрического экрана (например, по часовой стрелке, как указано на схеме) одновременно с соответствующим перемещением центра проекции S по окружности радиуса r вокруг центра экрана O . Следствием этого вращения, как нетрудно заметить, является соответствующее перемещение точки p по окружности радиуса $L = OP$ вокруг центра экрана O . Таким образом, зрители, сидящие вокруг экрана на расстоянии L от центра экрана, последовательно по времени будут видеть проекцию изображения. Очевидно, в каждый данный момент изображение на экране будет видеть зритель, находящийся на расстоянии L от центра экрана только в точке, лежащей на продолжении прямой, соединяющей центр экрана с положением, занимаемым в данный момент центром проекции S . При значительной угловой скорости перемещения проецируемого изображения по экрану каждый зритель, находящийся в любой точке P , будет через незначительные интервалы времени видеть последовательно чередующиеся на экране изображения. Если скорость чередования изображений будет превышать частоту слияния мерцаний (составляющую 48 кадров в секунду), то видимые зрителями последовательные изображения будут восприниматься слитно, без мельканий.

Вращение центра проекции создает возможность наблюдения проецируемого на экран изображения не только зрителями, находящимися на расстоянии L от центра экрана, но также зрителями, сидящими на расстояниях больших и меньших, чем L . Эти зрители увидят не все изобра-

жение сразу, а будут воспринимать его последовательно, по частям. Так, например, во время проецирования изображения a_1b_1 из центра проекции S_1 (рис. 224) зритель, находящийся в точке P_1 , увидит одновременно все изображение a_1b_1 . Зритель, находящийся ближе к экрану в точке K , увидит в это время только край изображения b_1 , а сидящий в удаленной точке n увидит только другой край изображения a_1 . При перемещении центра проекции в S_2 на экране изображение будет занимать положение a_2b_2 . В это время зритель, находящийся в точке P_1 , уже не будет видеть

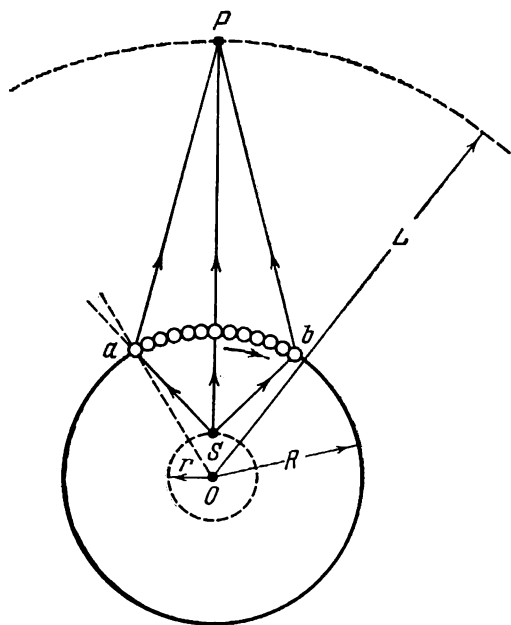


Рис. 222. Оптическая схема проекции на цилиндрическую линзово-растровую поверхность

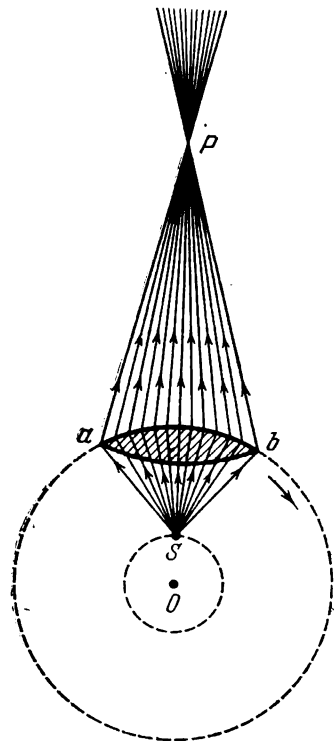


Рис. 223. Эквивалентная схема проекции на цилиндрическую поверхность, замененную линзой

никакого изображения, полное изображение зритель будет видеть лишь в точке P_2 . Зрители, помещающиеся в точках K и n , лежащих на продолжении прямой OS_2 , очевидно, будут в это время видеть только центр проецируемого изображения a_2b_2 . При дальнейшем перемещении центра проекции в положение S_3 на экране будет проецироваться изображение a_3b_3 , полностью видимое из точки P_3 . В это время в точке K будет виден только край a_3 изображения, а в точке n — только край b_3 .

Таким образом, при перемещении центра проекции из положения S_1 в положение S_3 в точках K и n последовательно будут видны все участки проецируемого изображения ab , причем в точке K последовательно будут видны все участки изображения от b до a , а в точке n — от a до b . Так как в точках K и n все изображение ab воспринимается за некоторый малый промежуток времени, за который изображение перемещается из положения a_1b_1 в положение a_3b_3 на угловую величину $\varphi \leq \angle P_1OP_3$, то зрители видят в этих точках несколько трансформированные изображения по ширине. В точке K видимая ширина изображения a_3b_1 несколько меньше действительного размера $ab = a_1b_1 = a_2b_2 = a_3b_3$. В точке n видимое изо-

бражение имеет ширину a_1b_3 , несколько большую действительной ширины ab . Таким образом, для зрителей, сидящих близко от экрана, трансформация изображения выражается в некотором сужении ширины видимого изображения. Чем дальше от экрана находится зритель, тем эта трансформация делается меньше и при дальнейшем удалении за линию нормального видения переходит в обратную трансформацию, увеличивающую видимую ширину изображения.

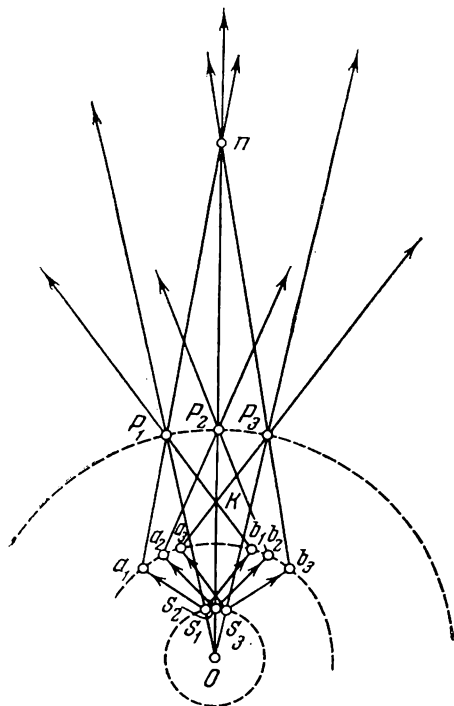


Рис. 224. Схема, поясняющая последовательность наблюдения зрителями различных участков изображения на экране

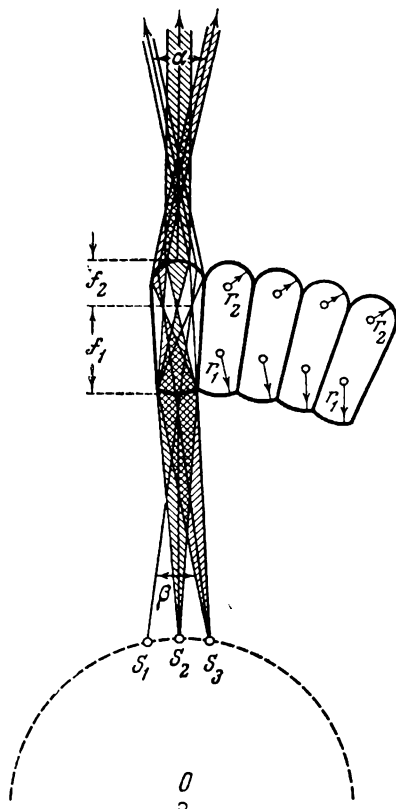


Рис. 225. Схематический разрез участка оптической поверхности цилиндрического экрана в горизонтальном сечении

Принцип действия оптической поверхности экрана может быть рассмотрен на рис. 225, схематически представляющем участок поверхности экрана в сечении его горизонтальной плоскостью.

Вращение изображения по цилиндрической поверхности экрана практически не может осуществляться поворотом проектора, для этого необходимо использовать принцип оптического вращения изображения.

При быстрой смене кадров проектируемого изображения на экран каждый глаз зрителя будет видеть свое изображение. Если изображения на последовательно проектируемых кадрах будут отличаться горизонтальным параллаксом, то зритель, находясь в любом месте перед экраном, всегда будет видеть правым и левым глазом частичные изображения стереограммы, отличающиеся тем большим параллаксом, чем ближе к экрану находится зритель. Следовательно, зритель всегда будет видеть естественное стереоскопическое изображение проектируемой картины, как в натуре, при приближении к экрану зритель будет охватывать взглядом

боковые стороны предмета. При обходе вокруг экрана зритель сможет осмотреть весь воспроизводимый на экране предмет со всех сторон.

Понятно, для такой проекции необходима последовательная съемка предмета с большого ряда точек зрения, расположенных вокруг этого предмета. Такая съемка может быть выполнена, например, при помощи киносъемочного аппарата, передвигаемого обездом вокруг воспроизводимого на экране объекта. При проекции снятых таким образом кадров необходимо, чтобы весь цикл кадров постоянно проектировался в течение одного оборота проецирующего на экран луча. Если же проекция цикла кадров, снятых при обезде вокруг предмета, не будет совершаться точно за время одного оборота этого луча, то воспроизводимая на экране пространственная картина будет представляться зрителю вращающейся вокруг своей оси.

Так как при данной системе проекции в каждой точке зрительного зала видно свое изображение на определенном участке экрана, то каждый глаз зрителя будет видеть свое изображение на участке экрана несколько отличным от участка, на котором видит это изображение другой глаз. Благодаря этому оптические оси глаз зрителей при рассматривании соответствующих точек изображения конвергируются не на плоскости экрана, а в пространстве за этой плоскостью (рис. 226), поэтому будет возникать определенный пластический эффект, усиливающий стереоскопичность изображения.

Посторонний свет из зала не будет создавать засветок изображения на этом экране, поэтому проекция может осуществляться в освещенном зале.

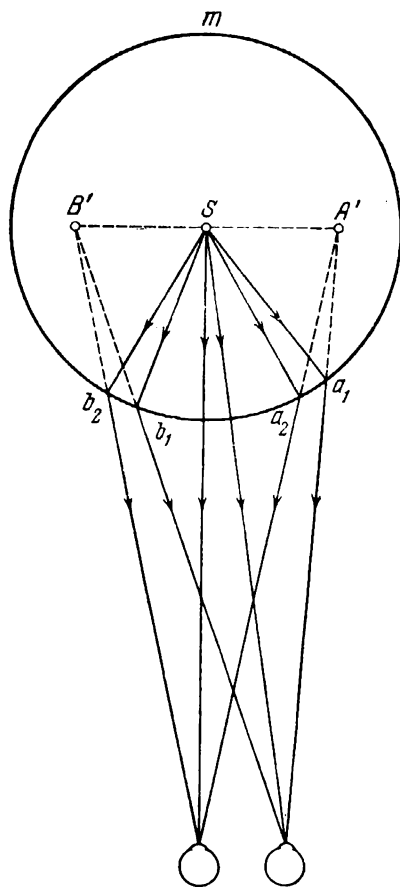


Рис. 226. Схема пространственного расположения изображения, видимого зрителями на цилиндрическом экране

Глава IX

МЕТРИКА СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

§ 1. Единицы измерения стереоскопического эффекта. § 2. Особенности воспроизведения пространственных соотношений в стереоскопическом изображении. § 3. Условия ортоморфического воспроизведения стереоскопического пространства. § 4. Теория деформации пространства изображений при стереопроекции на плоский экран. § 5. Определение деформации стереоскопического изображения на плоскости. § 6. Происхождение возможных ошибок при стереоскопических измерениях.

§ 1. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

В предыдущих главах мы рассмотрели физическую сущность процесса зрительного восприятия пространства, особенности стереоскопического эффекта бинокулярного зрения, позволяющие искусственно воспроизводить пространственно наблюдаемые изображения, и практическое использование стереоскопического эффекта в утилитарных целях применительно к различным областям науки, техники и искусства.

Однако мы так и не дали точной количественной характеристики стереоэффекта. Из изложенного должно быть ясно, что стереоскопичность, объемность наблюдаемого объекта, тем больше, чем ближе к наблюдателю расположен объект. При удалении объекта на некоторое расстояние r_0 , определяемое как радиус стереоскопического видения, пространственная форма его уже не может быть определена посредством стереоскопического зрения. С другой стороны, пользуясь бинокулярным зрительным прибором, мы можем увеличить естественный радиус стереоскопического видения во столько раз, во сколько базис между объективами прибора больше нормального межзрачкового базиса и во сколько раз оптический прибор увеличивает картину наблюдаемого объекта. Произведение этих двух отношений, обозначаемое Π , представляет собой полную пластику бинокулярного оптического прибора, показывающую, во сколько раз данный прибор расширяет пределы стереоскопического видения.

Таким образом, можно заметить, что пластика оптического прибора изменяет объем информации, даваемой стереовидением. Следовательно, пластика бинокулярных оптических приборов, пластика стереопроекционных оптических систем может служить относительной мерой стереовидения.

Однако посмотрим, какой же физический смысл имеет величина, которую количественно измеряет пластика. Информацию о глубине наблюдаемого пространства, которую дает нам стереовидение, очевидно, можно определять по аналогии с общими измерениями зрительной информации количеством различных деталей объекта. Если зрительную информацию, даваемую плоским рисунком, можно оценить количеством деталей изображения, которые глаз может различить в этом плоском рисунке, то объем информации, даваемый стереоскопическим видением о пространственном теле, можно характеризовать количеством различных по глу-

бине деталей этого объекта, иначе — количеством отдельно различных по глубине планов рассматриваемого пространства. Остановимся на приближенном рассмотрении данного положения.

Обратимся еще раз к определению разрешающей способности стереоскопического видения. На схематическом чертеже (рис. 227) L и R изображают соответственно точки зрения левого и правого глаза, разделенные базисом b_0 . Обоими глазами рассматривается находящийся на пределе различения малый отрезок $BD = \Delta l$, параллельный базису и находящийся на расстоянии r_B от глаз. Очевидно, на пересечении лучей, идущих от левого глаза к точке D и от правого глаза к точке B , может быть различима точка A , отстоящая от отрезка BD вперед на величину Δr_A , а на продолжении лучей, идущих от левого глаза к точке B и от правого глаза к точке D — точка C , отстоящая от отрезка BD назад на величину Δr_C , причем расстояние между точками и концами отрезка BD , так же как и ширина отрезка BD , определяется одними и теми же предельными углами зрения ω_L и ω_R левого и правого глаза.

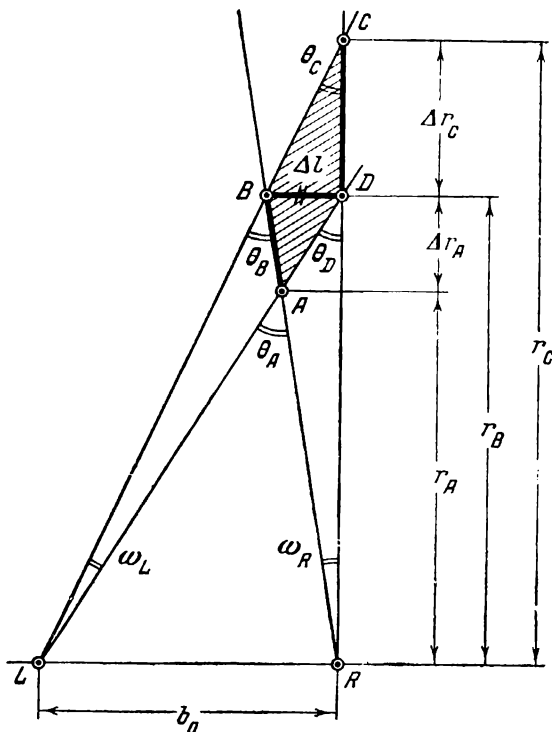


Рис. 227. Определение разрешающей способности стереоскопического восприятия пространства

Для обычных условий наблюдения прямым взглядом и при достаточном удалении объекта с большой степенью приближенности можно считать равными углы ω_L и ω_R , а также углы, под которыми обоими глазами рассматриваются концы отрезка BD , т. е. углы LBR и LDR . В этом случае можно написать:

$$\begin{aligned}\omega_L &= \omega_R = \omega, \\ \hat{LBR} &= \theta_B = \hat{LDR} = \theta_D = \theta.\end{aligned}\quad (1)$$

Из геометрических соотношений в этом случае следует:

$$\hat{LAR} = \theta_A = \theta + \omega, \quad (3)$$

$$\hat{LCR} = \theta_C = \theta - \omega. \quad (4)$$

На расстоянии r_B от глаз предельно различимая ширина детали в направлении, параллельном базису, определится величиной

$$\Delta l = \omega r_B. \quad (5)$$

Из подобия треугольников LAR и DAB получим

$$\Delta r_A = \Delta l \cdot \frac{r_A}{b_0}. \quad (6)$$

Принимая во внимание равенство (5) и выражая r_A через $r_B - \Delta r_A$, имеем

$$\Delta r_A = \Delta l \frac{r_B - \Delta r_A}{b_0} \quad \text{или} \quad \Delta r_A = \frac{\omega r_B^2}{b_0 + \omega r_B}. \quad (7)$$

Аналогично из подобия треугольников LCR и BCD имеем

$$\Delta r_C = \Delta l \frac{r_C}{b_0} \quad (8)$$

или

$$\Delta r_C = \frac{\omega r_B^2}{b_0 - \omega r_B}. \quad (9)$$

Равенства (7) и (9) определяют предельные величины замечаемых на глаз различий в удаленностях предметов, находящихся впереди или позади плоскости сравнения, удаленной от наблюдателя на расстояние r_B .

Обратные величины предельно различимых по глубине отстояний предметов $\frac{1}{\Delta r_A}$ и $\frac{1}{\Delta r_C}$ характеризуют разрешающую силу стереовидения при наблюдении объекта, находящегося перед плоскостью сравнения на удалении от r_B до r_A и за плоскостью сравнения — на удалении от r_B до r_C .

$$\frac{1}{\Delta r_A} = \frac{b_0}{\omega r_B^2} + \frac{1}{r_B}, \quad (10)$$

$$\frac{1}{\Delta r_C} = \frac{b_0}{\omega r_B^2} - \frac{1}{r_B}. \quad (11)$$

Разрешающая сила стереовидения при естественном наблюдении невооруженными глазами определяет количество планов, различимых на протяжении единицы глубины измерения расстояния, соответственно $\frac{1}{\Delta r_A}$ — в сторону приближения и $\frac{1}{\Delta r_C}$ — в сторону удаления от плоскости сравнения, находящейся на расстоянии r_B .

При определении разрешающей силы стереовидения вблизи плоскости сравнения на достаточно коротких отрезках глубины мы должны получить, естественно, очень близкие значения разрешающей силы, измеренной в прямом и обратном направлениях. Поэтому среднее значение разрешающей силы стереовидения на расстоянии r_B определим как

$$\frac{1}{\Delta r_B} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\Delta r_A} + \frac{1}{\Delta r_C} \right) \quad (12)$$

или, подставляя соответствующие значения $\frac{1}{\Delta r_A}$ и $\frac{1}{\Delta r_C}$ из (10) и (11), а также выражая разрешающую силу стереовидения на произвольном расстоянии r через $W(r)$, получим

$$W(r) = \frac{1}{\Delta r} = \frac{b_0}{\omega r^2}. \quad (13)$$

Если в полученной формуле величины b_0 и r выражать, например, в метрах, а ω — в радианах, то величина $W(r)$ будет иметь размерность m^{-1} и будет определять количество отдельно различимых планов на глубине пространства в 1 м, удаленного от наблюдателя на расстояние r метров. Полагая среднюю величину межзрачкового расстояния $b_0 = 65$ мм и величину предельного физиологического угла для бинокулярного зрения

равной $30''$ или в радианной мере $\omega = 0,000145$, можно для определения разрешающей силы стереовидения получить выражение

$$W(r) = \frac{0,065}{0,000145} \cdot \frac{1}{r^2} \approx \frac{450}{r^2} (M^{-1}). \quad (14)$$

Пользуясь этим выражением, можно определить, например, что на расстоянии 10 м мы на протяженности в 1 м можем различить до $4\frac{1}{2}$ раздельно видимых планов объекта, т. е. различить на объекте рельеф, если его глубина не меньше 22 см . Перенеся объект на более близкое к нам расстояние, например 2 м , мы уже сможем различить в нем до $112\frac{1}{2}$ планов, т. е. будем замечать рельеф, глубина которого превышает уже только $0,9\text{ см}$. Уместно обратить внимание, что в то время, как количество различных деталей в линейном отрезке, нормальном линии визирования глаз, уменьшается пропорционально удаленности наблюдаемого объекта, количество различаемых деталей в отрезке, расположенном вдоль линии визирования глаз, уменьшается пропорционально квадрату удаленности объекта.

Разрешающая сила стереовидения объекта, наблюдаемого через бинокулярный зрительный прибор, растет пропорционально увеличению действующего стереобазиса B и пропорционально увеличению прибора или соответствующего ему уменьшения величины предельного угла в Γ раз, и может быть выражена величиной

$$W'(r) = \frac{B}{\left(\frac{\omega}{\Gamma}\right) r^2} = \frac{\pi b_0}{\omega r^2}, \quad (15)$$

или

$$W'(r) = \Pi W(r) (M^{-1}). \quad (15^1)$$

Величина $W'(r)$, характеризующая разрешающую силу стереовидения, даваемую оптическим прибором, имеет ту же размерность, что и величина разрешающей силы стереовидения невооруженных глаз. Эта размерность, совпадает с размерностью оптической силы прибора и обычной линзы, выражаемых в обратных метрах, имеющих название диоптрий.

Очевидно, силу стереовидения также удобно определять диоптриями; в отличие от количественной меры оптической силы прибора их называют с т е р е о д и о п т р и я м и. Таким образом, стереодиоптриями мы будем измерять обратную величину различимой на данном расстоянии глубины рельефа, выраженной в метрах.

Величина Π , характеризующая пластику прибора, представляет собой безразмерный коэффициент, аналогичный по своему значению безразмерному коэффициенту, определяющему кратность увеличения оптической системы.

Пользуясь понятием разрешающей силы стереовидения, мы можем легко определить количество стереоскопически различимых планов на участке пространства, начинающемся на расстоянии r_1 и ограниченном расстоянием r_2 . По-видимому, количество планов, наблюдаемых на элементарном отрезке глубины пространства Δr , будет

$$W(r) \Delta r = \frac{b_0}{\omega r^2} \Delta r \quad (16)$$

На всем протяжении пространства от r_1 до r_2 число планов можно определить суммированием

$$|N|_{r_1}^{r_2} = \sum_{r_1}^{r_2} \frac{b_0}{\omega r^2} \cdot \Delta r. \quad (17)$$

Заменяя суммирование интегрированием, получаем

$$|N|_{r_1}^{r_2} = \frac{b_0}{\omega} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (18)$$

Определяя количество планов, стереоскопически различных в пространстве, простирающемся от r до бесконечности, на основании (18) можем записать:

$$N_{(r)} = \frac{b_0}{\omega r}. \quad (19)$$

При $b_0 = 0,065$ м и $\omega = 0,000145$ (30"), выражая r в метрах, имеем

$$N_{(r)} = \frac{450}{r}. \quad (20)$$

Количество планов стереоскопически различных по глубине рассматриваемого пространства, характеризует объем или мощность даваемой стереовидением информации.

Таким образом, за основную единицу измерения стереоскопического эффекта, очевидно, следует принять величину, определяющую количество стереоскопически различных планов в рассматриваемом пространственном объекте.

Приближая или удаляя рассматриваемый объект, мы тем самым изменяем и силу стереоскопического восприятия его образа.

Так, если рассматриваемый объект, имеющий в глубину протяженность d , находится на расстоянии r_1 от наблюдателя, то число стереоскопически различных планов в нем окажется, согласно (19), равным

$$|N|_{r_1}^{r_1+d} = \frac{b_0}{\omega} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_1+d} \right) = \frac{b_0}{\omega} \cdot \frac{d}{r_1(r_1+d)}. \quad (21)$$

При перенесении этого объекта на расстояние r_2 от наблюдателя число различных планов будет

$$|N|_{r_2}^{r_2+d} = \frac{b_0}{\omega} \cdot \frac{d}{r_2(r_2+d)}. \quad (22)$$

Разделив выражение (22) на (21), получим отношение

$$\frac{|N|_{r_2}^{r_2+d}}{|N|_{r_1}^{r_1+d}} = \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{(r_1+d)}{(r_2+d)},$$

откуда

$$|N|_{r_2}^{r_2+d} = \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{(r_1+d)}{(r_2+d)} \cdot |N|_{r_1}^{r_1+d}. \quad (23)$$

Последнее выражение показывает, во сколько раз меньше стереоскопичность объекта, имеющего протяженность по глубине d , при перенесении его с расстояния r_1 от наблюдателя на расстояние r_2 .

При наблюдении стереоскопического пространства через зрительные приборы или другие оптические устройства, в том числе при наблюдении стереоскопических изображений, воспроизводимых проекцией на экране, получаемый стереоэффект всегда характеризуется числом различных планов на глубине наблюдаемого пространства. Однако в этом случае число различных планов оказывается в Π раз большим, чем при непосредственном рассматривании объекта невооруженными глазами, т. е.

$$|N|_{r_1}^{r_2} = \frac{\pi b_0}{\omega} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (24)$$

Здесь надо снова иметь в виду, что под величиной полной пластики Π в данной формуле понимается произведение относительной пластики и эффективного увеличения прибора или проекционной системы. Под относительной пластикой понимается отношение действующего базиса прибора B к нормальному межзрачковому базису, а под эффективным увеличением прибора — относительная величина Γ , показывающая, во сколь-

ко раз повышает остроту зрения данный прибор. Так, например, если прибор создает увеличенное изображение, а угловая разрешающая способность его остается такой же, как у естественного зрения, то и эффективное увеличение остается равным единице ($\Gamma = 1$).

Итак, мы видим, эффективность стереовидения определяется различимостью рельефа рассматриваемого пространственного объекта и выражается числом различимых по глубине пространственных планов.

Однако какое же число планов по глубине пространства мы можем одновременно видеть? Возможное для одновременного наблюдения число планов, различимых по глубине наблюдаемого пространства, зависит от объема стереоаккомодации.

Рассматривая два разноудаленных предмета, мы замечаем, что если они находятся на значительном расстоянии друг от друга, мы не в состоянии одновременно наблюдать эти предметы с достаточной четкостью. Сближая предметы, мы находим то предельное расстояние между ними, при котором они ясно видны одновременно. Это предельное расстояние по глубине, которое определяет границы ясного стереоскопического видения, имеет различную величину в зависимости от общего удаления рассматриваемых предметов и определяется глубиной резкого изображения пространства, даваемого оптической системой глаза.

Как известно, диоптрийная глубина глаза определяется величиной T , измеряемой

$$T = \frac{\omega}{D}, \quad (25)$$

где ω — физиологический предельный угол остроты зрения, D — диаметр зрачка глаза.

При величине предельного угла, равной одной угловой минуте (в радианах $\omega = 0,00029$), и при диаметре отверстия зрачка $d = 4$ мм диоптрийная глубина глаза будет равна

$$T = \frac{0,00029}{0,004} \approx \frac{1}{14} \text{ диоптрии.}$$

Очевидно, глаз, аккомодированный на расстояние в 14 м, будет отчетливо видеть все предметы, находящиеся на удалении от 14 м до бесконечности и от 14 м до 7 м.

Мы можем определить, согласно (20), что на глубине от 7 м до бесконечности при стереоскопическом наблюдении человек может увидеть отчетливо примерно 65 планов глубины. Очевидно, при наблюдении на более близком расстоянии, глубина ясного видения позволит отчетливо видеть одновременно такое же число планов.

Глубина резкости глаза имеет индивидуальное значение для разных лиц и для разных условий зрительного восприятия, поэтому и количество одновременно наблюдаемых планов глубины, т. е. объем стереоаккомодации, несколько различается у разных лиц.

Количество одновременно наблюдаемых планов глубины пространства нами определено для условия неизменной аккомодации глаза; естественно, изменяя аккомодацию глаза, человек может последовательно рассмотреть всю глубину наблюдаемого им пространства со всеми планами, заключенными в нем от наиболее близкого плана ясного видения до бесконечности.

Если различимость отдельных планов стереоскопически наблюдаемого пространства характеризует минимальный параллакс (мин Δp) между соответствующими точками на сетчатках глаз, то объем стереоаккомодации определяет максимально допустимый параллакс (макс Δp) между этими точками, обуславливающий одновременно воспринимаемую глубину пространства.

§ 2. ОСОБЕННОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СООТНОШЕНИЙ В СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОМ ИЗОБРАЖЕНИИ

Существенной особенностью стереоскопически воспроизводимого пространства является то, что образ этого пространства воссоздается только в процессе наблюдения его зрителем. В зависимости от положения зрителя по отношению к плоскости проекции совмещенного стереоскопического изображения меняется геометрия наблюдаемого пространства.

В то время как оптические действительные или мнимые изображения, получаемые при помощи зеркал или линз, занимают в пространстве вполне определенное положение, геометрия которого определяется объективно,

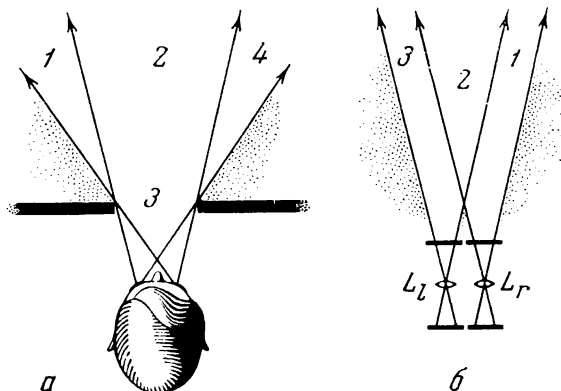


Рис. 228. Ограничение стереоскопического видения боковыми зонами монокулярного видения:

a — при наблюдении через окно (также при наблюдении интегральной фотографии): 1 — нестереоскопическая область видения правого глаза; 2 — стереоскопическое пространство; 3 — окно; 4 — нестереоскопическая область видения левого глаза; *b* — при наблюдении стереоскопической картины: 1 — нестереоскопическая область видения правого глаза; 2 — стереоскопическое пространство; 3 — нестереоскопическая область видения левого глаза

независимо от местонахождения наблюдателя, рассматривающего это изображение, геометрия пространственных стереоскопических изображений строится субъективно каждым зрителем в зависимости от выбранной им позиции для наблюдения.

Мы знаем, что при наблюдении стереоскопической картины глубина воспроизводимого рельефа нам кажется тем больше, чем с более дальнего расстояния мы наблюдаем картину. При смещении зрителя вбок от осевой линии стереокартины пространственное изображение искажается и весь выступающий рельеф как бы вытягивается в сторону зрителя. Таким образом, надо иметь

в виду, что в стереокинотеатре каждый зритель по-своему субъективно воспринимает геометрическую форму воспроизводимого изображения.

Геометрия пространства, воспроизводимого интегральным изображением, существенно отличается от стереоскопического воспроизведения. Пространство, воспроизводимое интегральной фотографией, представляется объективно существующим независимо от наблюдателя и жестко связывается с изображающей плоскостью этой фотографии.

Наблюдение интегральной фотографии совершенно идентично рассматриванию естественных объектов через окно. В этом случае бинокулярным зрением охватывается только средняя часть поля зрения, боковые же полосы поля зрения просматриваются одним глазом — либо правым, либо левым. Причем для естественного наблюдения картины через окно, так же как для наблюдения картины на интегральной фотографии, характерно просматривание правой боковой полосы зрения левым глазом, а левой боковой полосы — правым глазом (схематично изображено на рис. 228, *a*). При рассматривании стереоскопической картины также бинокулярно просматривается только средняя полоса поля зрения, а боковые полосы видны только одним глазом. Однако в этом случае, как можно видеть из рис. 228, *b*, правая боковая полоса поля зрения наблюдается уже правым глазом, а левая — левым. Это обстоятельство накладывает характерный

отпечаток на восприятие стереоскопически воспроизводимой пространственной картины.

Рассмотрим еще одну важную особенность стереовидения. При наблюдении пары сопряженных стереоизображений в стереоскопе или на стереоэкране зритель каждым глазом видит (рис. 229) соответствующие точки левого (a_l) и правого (a_r) изображений на продолжении визирных осей, пересекающихся в точке A , определяющей положение наблюдаемой детали, например, в заэкранном пространстве. В данном случае при раздви-

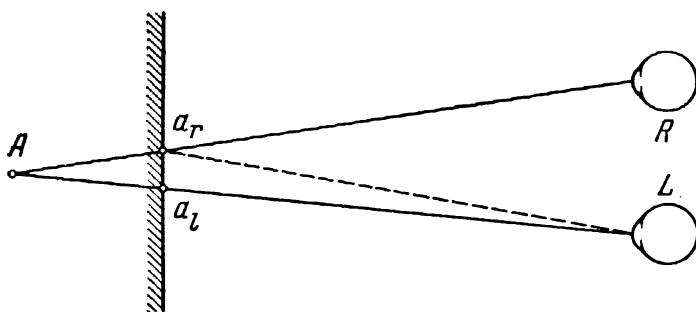


Рис. 229. К определению угла визирования пространственного изображения точки

жении точек a_l и a_r друг от друга угол между визирными осями будет уменьшаться и стереоскопически видимая точка будет удаляться вглубь, за экран. Казалось бы, мы ничем не ограничены в раздвижении этих точек на экране, пока визирные оси не станут параллельными. Однако практически раздвижение точек ограничивается некоторой предельной величиной параллакса, по достижении которой слитное восприятие единого зрительного образа этих точек нарушается и изображения точек, видимых правым и левым глазом, начинают восприниматься раздельно. Раздваивание изображения начинается при разной величине параллакса между сопряженными точками, в зависимости от удаленности от зрителя экрана, на который проецируются эти точки.

Само раздваивание слитного стереоскопического изображения объясняется в этом случае разрывом конвергенции с аккомодационными усилиями глаз, фиксирующих плоскость экрана. Такой разрыв происходит, когда разность углов $\angle L\hat{a}_rR$ и $\angle LAR$ превосходит $1^\circ,6$. Этим предельным углом определяется возможная глубина воспроизведения стереоскопического эффекта в заэкранном пространстве. Совершенно аналогично определяется и возможная глубина воспроизведения стереоскопического пространства в предэкранном пространстве.

Мы можем в некоторых случаях при достаточно удаленном экране получить параллакс между точками a_r и a_l на экране, превосходящий межзрачковое расстояние, и тогда визирные оси глаз будут расходиться в пространстве за экраном, а стереоскопическое наблюдение точки A будет происходить дивергированными глазами. Однако, если слитное восприятие наблюдаемой точки при этом не будет нарушено, мы также будем видеть точку A находящейся в пространстве за экраном. И что особенно характерно, эта точка всегда будет казаться расположенной на конечном расстоянии от экрана, но отнюдь не лежащей в бесконечности, как это можно было бы предположить, исходя из геометрических построений.

Чтобы понять эту особенность стереоскопического воспроизведения пространства, рассмотрим несколько детальнее пределы, ограничивающие передачу переднего и заднего планов на стереоскопическом экране.

На рис. 230 схематично изображено, как зритель правым (E_r) и левым (E_l) глазом в предэкранном пространстве стереоскопически наблюдает точку D_1 и в заэкранном пространстве — точку D_2 , которые удалены соответственно от глаз наблюдателя на расстояниях d_1 и d_2 , а от экрана — на расстояния Δ_1 и Δ_2 . Расстояние от зрителя до экрана обозначено величиной R , а базис зрения — величиной B . На экране параллакс соответственных точек b_1 и b_2 , изображающих дальнюю точку D_2 , обозначим величиной

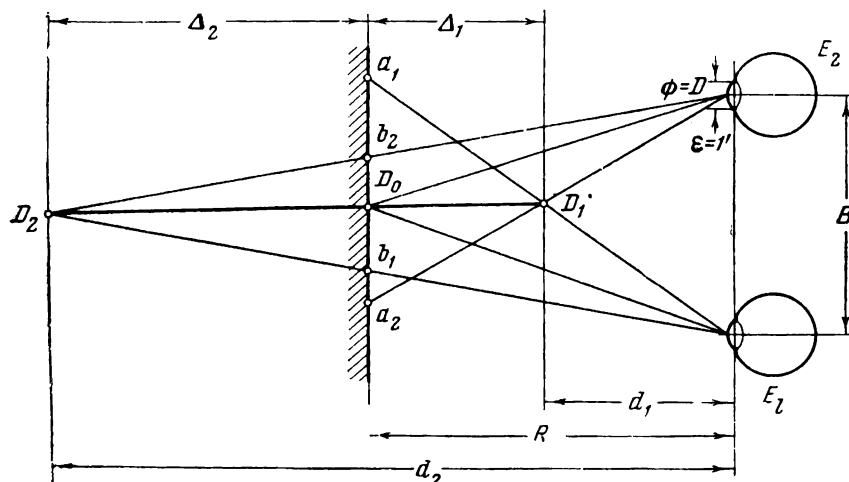


Рис. 230. Наблюдение стереоскопической модели точки в предэкранном и заэкранном пространстве

p_2 , а отрицательный параллакс, образованный на экране перемещенными точками a_1 и a_2 , изображающими ближнюю точку стереоскопического пространства D_1 , — величиной p_1 . Тогда из геометрических соотношений чертежа можно написать следующие равенства:

$$\frac{\Delta_1}{R - \Delta_1} = \frac{p_1}{B} \quad (1)$$

и

$$\frac{\Delta_2}{R + \Delta_2} = \frac{p_2}{B}. \quad (2)$$

Разделив почленно эти равенства и делая несложные преобразования, получаем

$$R(p_1\Delta_2 - p_2\Delta_1) = (p_1 + p_2)\Delta_1\Delta_2. \quad (3)$$

Полагая абсолютные значения максимальных величин положительного и отрицательного параллаксов равными, т. е.

$$|p_1|_{\max} = |p_2|_{\max},$$

из выражения (3) имеем

$$R(\Delta_2 - \Delta_1) = 2\Delta_1\Delta_2. \quad (4)$$

или

$$\frac{1}{\Delta_1} - \frac{1}{\Delta_2} = \frac{2}{R}. \quad (5)$$

Полагая $R = 2f$, для равенства (5) можем получить другое выражение в тривиальной форме:

$$\frac{1}{\Delta_1} - \frac{1}{\Delta_2} = \frac{1}{f}. \quad (6)$$

Величина $\frac{1}{f}$ выражает стереоскопическую силу экрана или стереоскопического зрительного прибора.

Предельное положение переднего плана перед экраном и заднего плана воспроизводимого пространственного изображения за экраном определяется допустимыми абсолютными величинами параллаксов соответственных точек изображения, наблюдаемых на экране. Эти предельные значения параллаксов являются функцией расстояния зрителя от экрана (R) и функцией увеличения оптической системы зрительного прибора (V), если наблюдение изображения ведется через оптическую систему. Возможная для стереоскопического наблюдения глубина воспроизводимого пространства определяется, как нами уже было сказано, объемом стереоаккомодации для того расстояния, на котором экран или стереотпечаток находится от глаз зрителя.

Глубина рельефа, возможная для стереоскопического воспроизведения в предэкранном пространстве Δ_1 , определяется соотношением

$$\Delta_1 = \frac{R^2\omega}{D + R\omega}, \quad (7)$$

а глубина рельефа, возможная для воспроизведения в заэкранном пространстве Δ_2 , как

$$\Delta_2 = \frac{R^2\omega}{D - R\omega}. \quad (8)$$

Здесь в обоих выражениях (7) и (8) через D обозначен диаметр зрачка глаза, через ω — предельный физиологический угол остроты зрения.

Если наблюдение стереоскопического изображения ведется через бинокулярную оптическую систему с увеличением V , то соответственно глубина передаваемого рельефа в предэкранном и заэкранном пространствах определяется выражениями

$$\Delta_1 = \frac{R^2\omega}{VD + R\omega}, \quad (9)$$

$$\Delta_2 = \frac{R^2\omega}{VD - R\omega}. \quad (10)$$

Пользуясь выражениями (7) и (8) или (9) и (10), мы можем определить пределы возможной передачи глубины пространства для любого стереоскопического изображения.

Так, если мы будем воспроизводить стереокартину на экране, удаленном от зрителя на расстояние $R = 10$ м, то, полагая величину действующего зрачка глаза $D = 4$ мм (0,004 м), для остроты зрения $\omega = 30''$ ($\omega = 0,000145$ рад), получим

$$\Delta_1 = \frac{10^2 \cdot 0,000145}{0,004 + 10 \cdot 0,00145} \approx 3 \text{ м},$$

для остроты зрения $\omega = 1'$ ($\omega = 0,00029$ рад) имеем

$$\Delta_1 = \frac{10^2 \cdot 0,00029}{0,004 + 10 \cdot 0,00029} = 5 \text{ м}.$$

Соответствующая глубина передачи рельефа в заэкранном пространстве определится, согласно (6), из выражения

$$\frac{1}{\Delta_2} = \frac{1}{\Delta_1} - \frac{1}{f}$$

и составит

$$\begin{aligned} \text{для } \omega = 30'' & \quad \Delta_2 \approx 7,5 \text{ м}; \\ \text{для } \omega = 1' & \quad \Delta_2 \approx \infty. \end{aligned}$$

Сравнивая полученные результаты, мы видим, что с наибольшей остротой зрения глубина рельефа передается в более ограниченном пространстве, а с меньшей остротой зрения — в более широкой зоне. Следовательно, в более широкой зоне стереоэффект ослабляется, так как вследствие потери остроты зрения уменьшается относительное количество стереоскопически различных планов, приходящееся на единицу глубины пространства в этой зоне. Полное нарушение стереоэффекта происходит, когда разрыв между углом конвергенции для стереоскопически наблюдаемой модели и углом конвергенции для плоскости экрана достигает величины $1^\circ,6$. Это происходит приблизительно тогда, когда параллакс между одноименными точками правого и левого изображений достигает 0,03 от величины расстояний до экрана, т. е.

$$|p|_{\text{макс}} \leq 0,03R. \quad (11)$$

Для не слишком больших расстояний наблюдения, пользуясь соотношением (1) и принимая во внимание (11), предельную глубину предэкранного стереоскопического пространства можно приближенно определить формулой

$$|\Delta_1|_{\text{макс}} = \frac{pR}{B+p} = \frac{0,03R^2}{B+0,03R}. \quad (12)$$

Соответственно предельная глубина заэкранного пространства из соотношения (2) и (11) определяется так:

$$|\Delta_2|_{\text{макс}} = \frac{pR}{B-p} = \frac{0,03R^2}{B-0,03R}. \quad (13)$$

При $R = \frac{B}{0,03} = \frac{0,065}{0,03} \approx 2,2 \text{ м}$ выражение (13) дает бесконечно большое значение для $|\Delta_2|$. Однако в действительности зрительно воспринимаемая глубина заэкранного пространства довольно ограничена по глубине. Это явление объясняется тем, что в соответствии со сказанным выше острота зрения при значительных разрывах конвергенции глаз с аккомодацией сильно снижается. Сопоставляя выражения (13) и (8) или (12) и (7), можно определить предельно разрешимый физиологический угол ω для условий стереоскопического наблюдения, определяемых формулами (12) и (13), т. е. на пороге нарушения слитного восприятия единого пространственного изображения. В этом случае

$$\omega = \frac{0,03}{B} = 0,0018,$$

что соответствует в угловой мере $\omega = 6$.

При такой малой остроте зрения соответственным образом уменьшается радиус стереоскопического зрения и физиологически воспринимаемая дальняя граница стереоскопического видения определяется, согласно изложенному ранее, величиной

$$r_0 = \frac{b_0}{\omega} = \frac{0,065}{0,0018} = 36 \text{ м}.$$

Таким образом, построения, сделанные по законам геометрической оптики, в данном случае не дают правильного решения задачи. Физиологические законы различения глубинных планов налагают ограничения на геометрические определения стереоскопического пространства.

Обратим внимание еще на одну особенность зрительного восприятия стереоскопического изображения. Если мы рассматриваем раздельно правым и левым глазом наложенные на экране два сопряженных изображения стереопары, то, как нам известно, получаем зрительно воспринимаемый пространственный образ или так называемую стереоскопическую модель объекта. Сопряженные точки правого и левого изображений стереопары, которые совмещаются друг с другом на экране, воспроизводят детали стереоскопической модели, совмещенные с плоскостью экрана. Сопряженные точки изображений стереопары, проецирующиеся на экран с отрицательным параллаксом, воспроизводят детали стереоскопической модели в предэкранном пространстве, а точки, проектирующиеся с положительным параллаксом, — детали в заэкранном пространстве.

Сдвигая или раздвигая на экране сопряженные изображения стереопары, мы можем перемещать всю стереоскопическую модель либо вперед, выдвигая ее в предэкранное пространство, либо назад, в заэкранное пространство. Выдвижение стереоскопической модели вперед, в предэкранное пространство мы можем делать до тех пор, пока передний план стереомодели не начнет двоиться. Последнее произойдет при выходе переднего плана на величину $|\Delta_2|_{\text{макс}}$, определяемую по соотношению (13). Стереомодель, перемещаясь в заэкранное пространство, вначале заметно передвигается вглубь, за поверхность экрана, а затем, как бы мы ни раздвигали оба сопряженных изображения вплоть до наблюдения изображения дивергированными глазами, в пределах ясного видения остается на одной и той же глубине за поверхностью экрана.

Объясняется это тем, что для сохранения ясного видения визирные оси глаз направляются на средний план стереоскопической модели, и при этом из-за поворота глазных яблок центральный план стереомодели при всех взаимных перемещениях сопряженных изображений стереопары на экране продолжает проектироваться на fovea centralis (центральную ямку) сетчатки обоих глаз. Последнее можно иллюстрировать схематическим чертежом (рис. 231).

При фиксации обоими глазами на экране какой-то точки a визирные оси обоих глаз направляются на эту точку, и, следовательно, проекция этой точки в обоих глазах на сетчатках падает на центральные ямки. При раздвижении совмещенных точек в новое положение a_1 для левого глаза и a_2 для правого глаза глазные яблоки поворачиваются так, что визирные оси каждого глаза опять фиксируют каждым глазом соответствующие точки a_1 и a_2 , проекции которых снова ложатся на центральные ямки каждого глаза. Так как каждый участок сетчатки связан с определенными участками коры головного мозга, то, поскольку изображения наблюдаемых точек a_1 и a_2 при их раздвижении по экрану и при соответствующих поворотах глазных яблок остаются проектируемыми на одни и те же участки сетчатки, эти изображения также оказываются «проектируемыми» на одни и те же участки коры головного мозга. Видимо, если мы будем рассматривать на экране не две сопряженные точки, а два сопряженных изображения, отличающиеся своей диспаратностью отдельных элементов, то при пере-

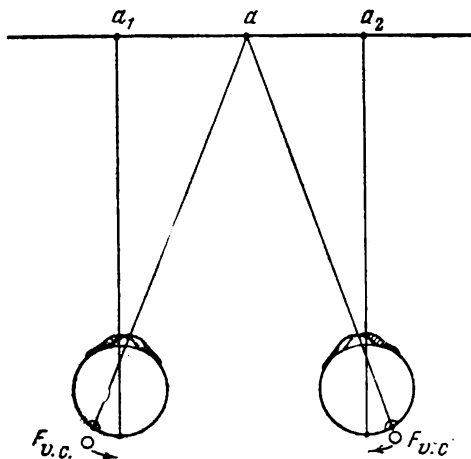


Рис. 231. Схема наблюдения стереоскопической модели дивергированными глазами

мещениях обоих изображений по экрану и взаимно связанных с ними поворотами глазных яблок проекция диспаратности обоих изображений будет отображаться на кору головного мозга в неизменяемом виде. Следовательно, мозг будет получать одну и ту же информацию об изображениях независимо от их перемещений по экрану.

Увеличить пространственную глубину рассматриваемой стереомодели можно только путем увеличения относительных параллаксов, т. е. путем увеличения диспаратности обоих изображений, проектирующихся на сетчатки правого и левого глаза зрителя. Таким образом, мы должны заметить, что не абсолютные, а относительные параллаксы (обуславливающие диспаратность изображений на сетчатках глаз) дают представление о глубине стереоскопического пространства. Поэтому стереоэффект не зависит от того, как рассматриваются сопряженные изображения стереопары — конвергированными или дивергированными осями глаз.

Учитывая изложенные здесь замечания относительно особенностей воспроизведения пространственных соотношений в стереоскопическом изображении, мы видим, что стереоскопически наблюдаемый зрительный образ восстанавливает далеко не всегда стереоскопическую модель, пространственно подобную объекту. Мерой подобия стереоскопической модели — действительному пространственному объекту, отображаемому этой моделью, — служит анаморфичность воспроизводимого стереоскопически пространства. Полное подобие обоих пространств достигается при ортоморфическом воспроизведении стереоскопического изображения.

Ниже мы рассмотрим условия ортоморфического воспроизведения пространства на стереофотографиях и на стереоэкранах. Но прежде рассмотрим условия передачи пространственных соотношений в стереоскопическом изображении, воспроизводимом линейной проекцией. Подобные условия воспроизведения стереоскопических изображений встречаются в рентгеностереоскопии и в других стереоскопических методах исследований в технике.

§ 3. УСЛОВИЯ ОРТОМОРФИЧЕСКОГО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Орточереоскопическим изображением называется стереоскопическое изображение, которое характеризуется геометрически правильной моделью рельефа, неискаженной перспективой, обеспечивающей зрительное слияние двух изображений стереограммы в единый пространственный образ.

Ниже рассмотрим условия, необходимые для получения орточереоскопических изображений. Систему двух объективов стереоскопического фотоаппарата будем называть первичной изображающей системой, а окулярную систему стереоскопа, составленную из двух линз для рассматривания изображения, — вторичной изображающей системой.

На рис. 232 показаны три оптические схемы, поэтапно используемые для получения стереоскопического изображения: а) первичная изображающая система (оптика стереофотоаппарата); б) вторичная проектирующая система (оборачивающая и совмещающая оба изображения); в) изображение в том виде, каким его воспринимает наблюдатель через стереоскоп или окуляры, или то, что называется пространством образования изображения для всей системы. Первая схема (рис. 232, а) этого рисунка показывает, как первичная изображающая система дает два действительных увеличенных изображения. Увеличение M_c будем называть первичным (или фотографическим), оно равняется отношению расстояния от объ-

ектива до изображения к расстоянию от объектива до предмета. Из схемы видно, что расстояние между двумя изображениями стереограмм есть функция первичного увеличения M_C и стереобазиса. На двух изображениях показаны точки 1, 2, 3, отличные одна от другой по расстоянию. Этот результат, даваемый первичной изображающей системой, зависит от расстояния передних узловых точек объективов от предмета и от расстояния

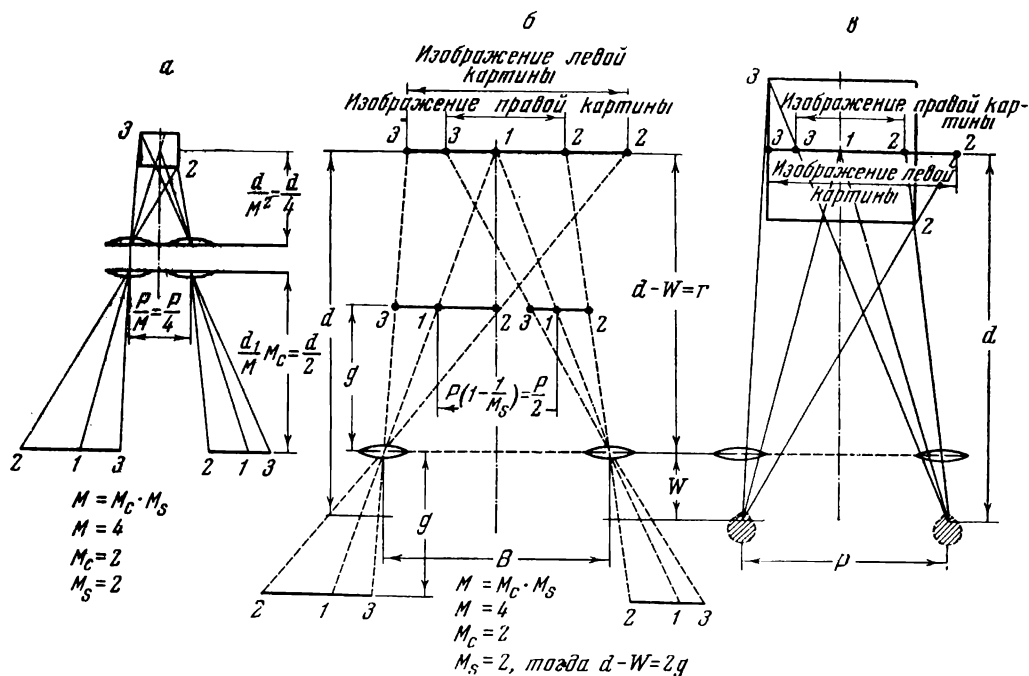


Рис. 232. Этапы получения стереоскопического изображения. Схема графически составлена для получения ортостереоскопичности при $M = 4$, $M_C = 2$, $M_S = 2$

между этими двумя передними узловыми точками. Точку 1, взятую в центре области глубины фокуса объектива, мы называем точкой отсчета. Расстояние между точкой отсчета и плоскостью, в которой находятся передние узловые точки объективов, принимаем за расстояние до предмета. Пространство перед плоскостью, содержащей передние узловые точки объективов, будем называть предметным пространством системы.

На рис. 232, б показано, что два действительных перевернутых и перемещенных места изображения сфотографированной стереограммы помещаются перед объективами вторичной изображающей системы, в результате чего мы получаем мнимые изображения фотографии или действительные изображения предмета при увеличении M_S . Это увеличение будем называть вторичным (или проекционным). Полученные изображения компланарны, т. е. лежат в одной плоскости; они перекрывают друг друга на некоторую величину, зависящую от расстояния между фотографиями. Расстояния компланарных изображений от фотографий или от объективов зависят от расстояния между объективами и фотографиями и от фокусных расстояний объективов.

На рис. 232, в показано пространство изображения для всей системы.

Стереоскоп должен давать возможность селективного (избирательно) рассматривания этих изображений (левый глаз должен видеть все точки только левого изображения, правый глаз — все точки только правого изображения). Угол, под которым любая точка будет видна правым

глазом, отличается от угла, под которым эта же точка видна левым глазом. Точка пересечения линий, определяющих эти направления, будет кажущимся местом нахождения этой точки в пространстве. Сложение этих точек в пространстве изображения дает объемное, стереоскопическое изображение.

Из приведенного выше описания мы можем сделать следующие выводы.

1. Получение стереоскопических изображений делится на три этапа, два из которых выполняются оптическими инструментами. Каждый из последних дает некоторое увеличение. Увеличение, получаемое в окончательном изображении, равно произведению M_C и M_S первичных и вторичных увеличений.

2. Характер получаемых изображений есть функция целого ряда факторов: расстояния до предмета; расстояния между первичными изображениями в приспособлении для рассматривания; фокусного расстояния вторичной изображающей системы линз и расстояния первичных изображений от вторичной изображающей системы линз, причем все это зависит от того расстояния до глаз, на котором должно получаться окончательное изображение, а также от увеличения, при котором это изображение рассматривается. От влияния этих факторов зависит получение ортостереоскопического изображения.

При заданном увеличении M для ортостереоскопического воспроизведения необходимо получать изображения на определенном расстоянии от глаз. Это расстояние мы будем называть **н о р м а л ь н ы м р а с с т о я н и е м** рассматривания ортостереоскопического изображения. Оно должно лежать в пределах легкой аккомодации глаза порядка 150 мм и не далее предельного расстояния, при котором получается стереоскопическое восприятие изображения.

Рассмотрим теперь при помощи рис. 233, где должна быть помещена первая узловая точка объективов первичной изображающей системы для того, чтобы эти объективы «видели» предмет точно так же, как невооруженные глаза видят увеличенное в M раз изображение. Линии $O_1 O_1$ и $O_2 O_2$ в пространстве объекта, изображенном на меньшем рисунке, представляют собой две главные оси (параллельные одна другой) первичной изображающей системы, схематически представленной в виде двух объективов L_1 и L_2 . Первые узловые точки в первичной изображающей системе представляются двумя точками внутри объективов, в которых пересекаются линии. Пространство перед этими двумя точками охватывает все предметное пространство для всей стереосистемы.

В пространстве изображений, представленном на более крупном рисунке, линии $O_1' O_1'$ и $O_2' O_2'$ параллельны главным осям, проходящим через зрачки глаза E_1 и E_2 , разделенные расстоянием P . Эти точки представляют передние узловые точки глаз. Все пространство перед ними является пространством изображения для стереосистемы. Точки P_1' , P_2' и P_3' — мнимые ортостереоскопические изображения точек P_1 , P_2 и P_3 . Точка P_3' находится на нормальном расстоянии рассматривания d от плоскости, содержащей первые узловые точки глаз, а соответствующая ей точка P_3 лежит в центре глубины фокуса первичной изображающей системы на расстоянии $\frac{d}{M}$ от плоскости, содержащей первую узловую точку первичной изображающей системы. Расстояние между этими узловыми точками в этой плоскости должно быть равно $\frac{P}{M}$, для того чтобы точки

P_3 и P_3' были подобно расположены у предмета и у изображения в обоих пространствах по отношению к узловым точкам объективов и глаз.

Точки P_1 , P_2 , расположенные аналогично в двух ортоморфических частях пространства, дадут соответственно расположенные точки P_1' , P_2' . Также будут расположены и все другие точки в этих двух частях пространства.

Из изложенного выше мы можем сформулировать необходимые условия для выполнения ортоморфичности предметного пространства и пространства изображения. Переднюю узловую точку первичной изображающей системы будем рассматривать как часть предметного пространства, передние узловые точки глаз — как часть пространства изображения. Отношение между масштабом пространства изображения и предметным пространством должно равняться M , т. е. окончательному увеличению.

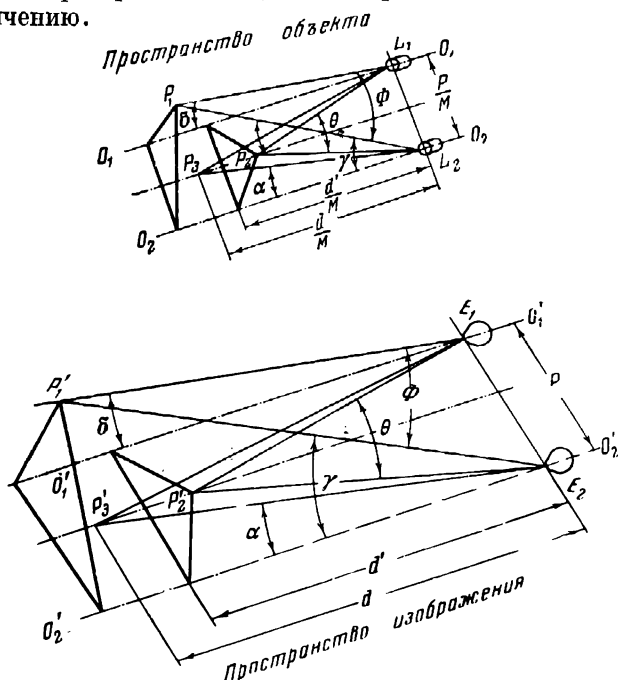


Рис. 233. Расположение передних узловых точек первичной изображающей системы

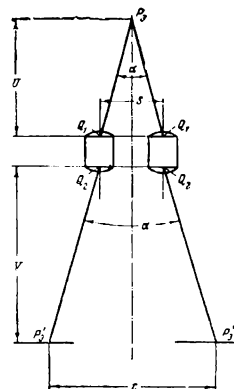


Рис. 234. Геометрия первичной изображающей системы

Угловое соотношение между точками в предметном пространстве, отнесенное к передним узловым точкам двух первичных изображающих объективов, должно быть тождественно с угловыми соотношениями между соответствующими точками в пространстве изображения, отнесенными к передним узловым точкам глаза. Расстояния всех точек одна от другой в предметном пространстве (включая расстояние между передними узловыми точками первичной изображающей системы) должны быть в M раз меньше расстояния в пространстве изображения.

При использовании первичной изображающей системы в конструкциях фотокамер, бинокулярных зрительных приборов и другой стереоаппаратуры для создания ортостереоскопических изображений или ортостереограмм передние узловые точки первичной изображающей системы должны лежать в плоскости, отстоящей от точки отсчета на расстоянии, равном нормальному расстоянию рассматривания, деленному на увеличение M . Передние узловые точки должны отстоять одна от другой в этой плоскости на расстоянии P , равном расстоянию между передними узловыми точками глаз, деленному на увеличение M .

Произведение увеличения M_C первичной изображающей системы (фотографические объективы) и увеличения M_S вторичной изображающей системы (линза, стереоскоп, окуляр) равно увеличению M . Только тогда, когда соблюдены все эти условия, первичная изображающая система будет «видеть» предмет ортостереоскопично.

Все остальные условия, относящиеся к первичной изображающей системе, можно определить на основе законов геометрической оптики по схеме, данной на рис. 234. На рисунке изображены два объектива с передними узловыми точками Q_1 и задними узловыми точками Q_2 , разделенные базисом S , которые дают изображение объекта P_3 в точках P_3' , разделенных расстоянием t . Объект удален от передних узловых точек объектива на расстояние u , а его действительные изображения получаются за объективами на расстоянии v от задней узловой точки. Угол, под которым виден объект из передних узловых точек объективов, определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \frac{1}{2} \alpha = \frac{S}{2u} = \frac{P}{2d}, \quad (1)$$

где P — расстояние между зрачками; d — нормальное расстояние рассматривания.

Используя прежние обозначения: M — окончательное увеличение, M_C — увеличение первичной изображающей системы, M_S — увеличение вторичной изображающей системы и f_S — фокусное расстояние объективов первичной изображающей системы, можно составить группу уравнений, определяющих все соотношения первичной изображающей системы в следующем виде:

$$M = M_C \times M_S = u \frac{d}{M}; \quad S = \frac{P}{M}; \quad (2)$$

$$v = u \times M_C = \frac{d M_C}{M} = \frac{d}{M_S}; \quad (3)$$

$$t = \frac{S(u+v)}{u} = \frac{P}{M} (1 + M_C) = P \left(\frac{1}{M} + \frac{1}{M_S} \right); \quad (4)$$

$$f_S = \frac{uv}{u+v} = \frac{d M_C}{M(1 + M_S)} = \frac{d}{M + M_S}. \quad (5)$$

Уравнения для определения всех требуемых размеров и фокусного расстояния окуляров для вторичной изображающей системы определяются следующими условиями. Два действительных изображения, даваемых первичной изображающей системой, должны быть помещены перед двумя окулярами вторичной изображающей системы так, чтобы отдельные мнимые изображения каждого из первичных действительных изображений (например, фотографий, помещенных в стереоскоп) были образованы таким образом, чтобы изображения точки отсчета P_3 в двух мнимых изображениях совпадали на нормальном расстоянии рассматривания. Чтобы сепарировать, т. е. разделить, эти изображения для раздельного видения правым и левым глазом, вторичная изображающая система (стереоскоп) должна быть снабжена соответствующими перегородками или системой призм с ограниченным полем зрения.

На рис. 235 показано схематическое устройство вторичной изображающей системы с положительными и отрицательными линзами в качестве окуляров. Из геометрических соотношений, представленных на схеме, могут быть выделены основные уравнения этой изображающей системы, выраженные через M , M_C , M_S , P и d . На рисунке буквами обозначено: w — расстояние от передних узловых точек глаз до задних узловых точек линз; N_1 — задние и N_2 — передние узловые точки линз; g — расстояние от передних узловых точек линз до действительных изображений; r — расстояние от задних узловых точек линз до мнимых изображений точки отсчета; h — расстояние между центрами действительных изображений; P_3' — действительное изображение точки отсчета предмета и P_3'' — мнимые изображения точек P_3' , даваемые вторичной изображающей системой.

Увеличение вторичной изображающей системы определяется соотношениями

$$M_S = \frac{M}{M_C} = \frac{r}{g} = \frac{d-w}{g}. \quad (6)$$

Угол конвергенции оптических осей глаз α определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P}{2d}. \quad (7)$$

Система с положительными линзами определяется условиями

$$M > M_C \quad \text{и} \quad M_S > 1, \quad (8)$$

для этой системы имеем

$$h = P \left(1 - \frac{g}{r} \right) = P \left(1 - \frac{1}{M_S} \right) = P \left(1 - \frac{M_C}{M} \right). \quad (9)$$

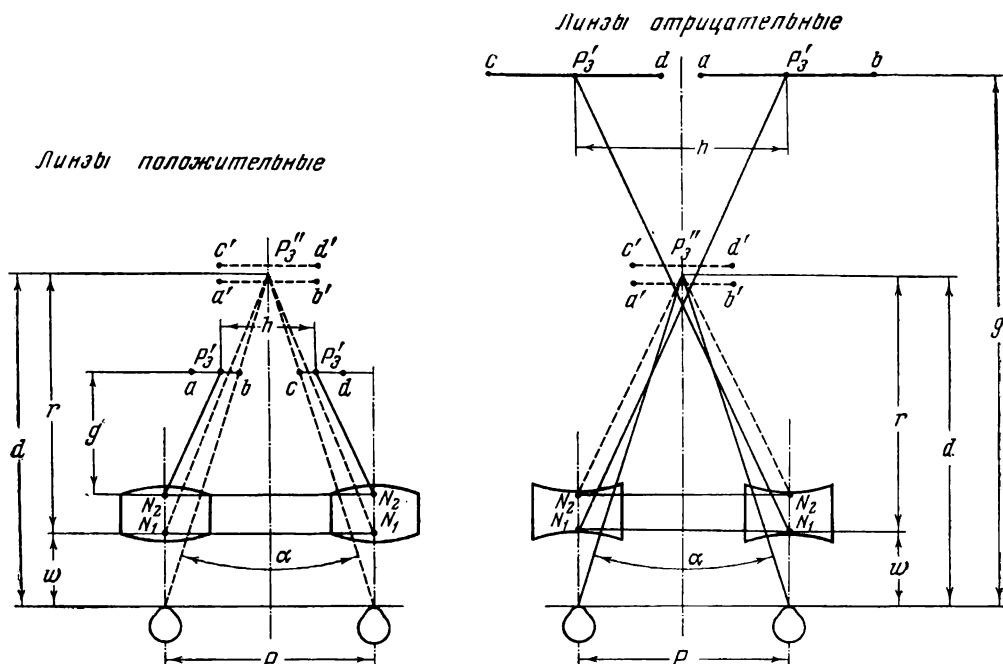


Рис. 235. Геометрия вторичной изображающей системы

Фокусное расстояние линз f_S определяется соотношениями

$$f_S = \frac{gr}{r-g} = \frac{r}{M_S - 1} = \frac{r \cdot M_C}{M - M_S}. \quad (10)$$

Для системы с отрицательными линзами эти соотношения будут соответственно

$$M < M_C \quad \text{и} \quad M_S < 1, \quad (11)$$

$$h = P \left(\frac{g}{r} - 1 \right) = P \left(\frac{1}{M_S} - 1 \right) = P \left(\frac{M_C}{M} - 1 \right), \quad (12)$$

$$f_S = \frac{gr}{g-r} = \frac{r}{1-M_S} = \frac{r M_C}{M_C - M}. \quad (13)$$

В уравнениях, устанавливающих условия для получения ортостереоскопичности, важным фактором является нормальное расстояние рассматривания, т. е. то расстояние, на котором получается мнимое рельефное изображение, и поэтому оно не может быть короче, чем расстояние, на котором может быть получена аккомодация (т. е. 150 мм), а также больше, чем предельное расстояние, на котором глаз может воспринимать стереоскопию.

На рис. 236 показаны точки A_1 и A_2 в пространстве перед глазами на некотором расстоянии d , большем наикратчайшего расстояния для удобной аккомодации. Они отдалены друг от друга на величину w в направлении наблюдения. Зрачки глаз E_1 и E_2 разделены базисом P . Точка A_1 видна глазами под углом α , точка A_2 — под углом β . Как показывают опыты, различие в удаленности точек может быть воспринято только тогда, когда разница между углами α и β , равная δ , больше, чем некоторый наименьший предельный угол. Значение δ получено приблизительно равным $10''$ для среднего нормального глаза. Чтобы обнаружить рельефность, т. е. чтобы расстояние между A_1 и A_2 оставалось заметным, δ должна быть не меньше величины этого предельного значения на любом расстоянии.

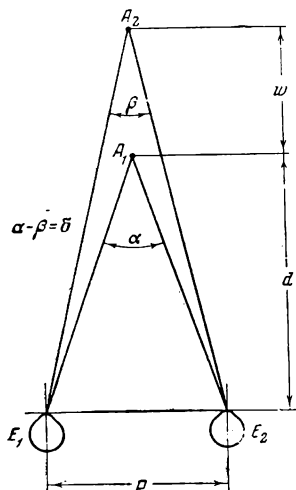


Рис. 236. Предельное расстояние рельефного рассматривания

С возрастанием d увеличивается w . Когда угол α будет равен δ , тогда угол β станет равен нулю, и точка A_2 будет лежать в бесконечности. Когда $\alpha = \beta = 10''$, d равно 1350 м, для нормального значения $P = 65$ мм. На расстоянии больше 1350 м глаза уже не воспринимают рельефа, и все предметы за этим расстоянием до бесконечности будут казаться лежащими на одинаковом удалении от глаз.

При увеличении вторичной изображающей системы (см. рис. 235) большем единицы расстояние g будет более коротким, чем d , и линзы будут положительными. При увеличении меньшем единицы расстояние g будет получено большее. Когда сила стереоскопа равна единице, вычисления показывают, что требуются линзы с фокусным расстоянием, равным бесконечности, т. е. линзы полностью отсутствуют.

При расстоянии g , равном d , два первичных действительных изображения совпадут друг с другом на нормальном расстоянии рассматривания. Это невозможно в линзовом стереоскопе обычного типа, но осуществимо, например, в зеркальном стереоскопе (рис. 237). При использовании в таком стереоскопе призм вместо зеркал с наружной отражающей поверхностью путь луча внутри стекла должен быть пересчитан на ход в воздухе, для того чтобы выдержать правильность расстояния. Здесь точки a , b , c и d указывают два первичных действительных изображения, a' , b' , c' , d' — два мнимых вторичных изображения.

В общем случае (рис. 235) ширина поля зрения стереоскопа ограничена расстоянием h между центрами изображений. Допустимая ширина предмета будет равна значению h , деленному на увеличение первичной изображающей системы M_c , т. е. когда M больше M_c или M_s больше 1, боковое поле будет равно

$$\frac{P}{M_c} \left(1 - \frac{1}{M_s} \right) = P \left(\frac{1}{M_s} - \frac{1}{M} \right). \quad (14)$$

Когда M меньше M_C или M_S меньше 1, боковое поле будет равно

$$\frac{P}{M_C} = \left(\frac{1}{M_S} - 1 \right) = P \left(\frac{1}{M} - \frac{1}{M_C} \right). \quad (15)$$

В стереоскопе оба изображения стереоскопической пары обычно монтируются в одной общей плоскости, причем воспроизводимое поле зрения

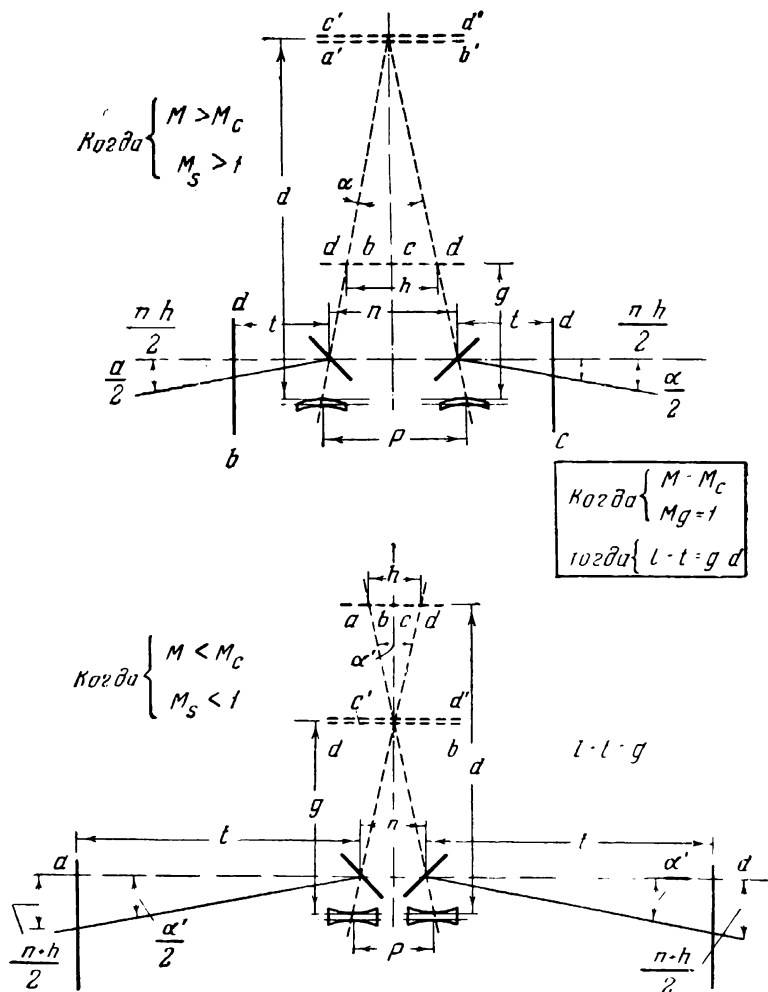


Рис. 237. Геометрия системы зеркального стереоскопа для получения ортостереоскопичности: сверху случай, когда $M > M_C$ и $M_S > 1$, внизу случай, когда $M < M_C$ и $M_S < 1$

в стереоскопе ограничивается полем зрения объективов фотоаппарата и полем зрения окуляров, в том числе зеркал и призм стереоскопа.

Спокойное удобное видение, свободное от утомления, может быть получено только при аккомодации на расстоянии пересечения визирных осей, т. е. когда аккомодация и конвергенция совпадают. Это требование обычно автоматически выполняется стереоскопической аппаратурой.

Чтобы добиться отсутствия искажений, объективы первичной и вторичной изображающей системы должны быть в значительной степени скорректированы, так как даже незначительная разница в расположении каждого из двух мнимых изображений точки вызывает кажущееся различие положения ее по глубине.

§ 4. ТЕОРИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПРОСТРАНСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ СТЕРЕОПРОЕКЦИИ НА ПЛОСКИЙ ЭКРАН

При наблюдении стереоскопической картины с фиксированных точек зрения, применяя соответствующие оптические преобразования изображений с соблюдением законов ортоморфического воспроизведения, всегда можно получить пространственное изображение объекта, геометрически подобное действительному объекту.

Совершенно иначе обстоит дело с воссозданием картины правильного подобия геометрических форм объекта при свободном наблюдении стереоскопической проекции на экране. Обратимся в качестве примера к рассмотрению схемы такого рода проекции, изображенной на рис. 238.

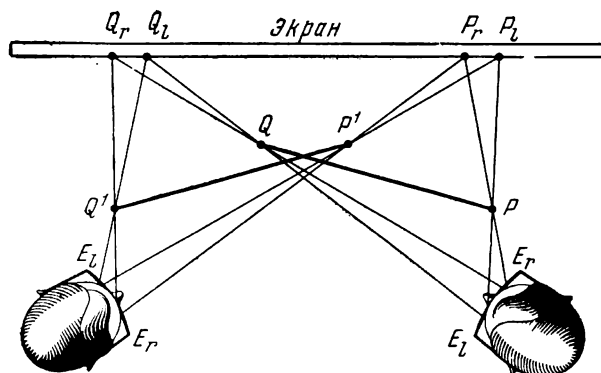


Рис. 238. Трансформация стереоскопического изображения в зависимости от места его наблюдения зрителем

Если на экране точки P_r и Q_r соответственно изображают правый и левый конец прямой, наблюдаемый зрителем правым глазом E_r , а точки P_l и Q_l изображают правый и левый конец этой прямой, наблюдаемый левым глазом E_l , то пространственное положение данного отрезка прямой зритель должен будет видеть перед экраном. При этом правый конец отрезка прямой зритель увидит на пересечении лучей $E_r P_r$ и $E_l P_l$, левый конец — на пересечении лучей $E_r Q_r$ и $E_l Q_l$.

Нетрудно заметить, что пространственное положение точек пересечения этих лучей перед экраном зависит от местонахождения зрителя. Для зрителя, находящегося у правого края экрана, отрезок прямой будет казаться в положении PQ , а для находящегося у левого края экрана — в положении $P'Q'$. Эти положения совершенно различны, т. е. видимое каждым зрителем пространственное положение отрезка прямой отлично от видимого другим зрителем.

В общем случае, видимые отрезки прямой оказываются различно повернутыми относительно плоскости экрана и могут иметь не одинаковые размеры. Нетрудно представить, что пространственные отображения различно ориентированных прямых, а следовательно, и пространственные соотношения стереоскопической картины в различных направлениях для каждого из зрителей, наблюдающих стереоскопическую проекцию на экране, будут различными.

Деформация стереоскопически отображаемого пространства зависит как от положения, занимаемого зрителем относительно экрана, так и от условий проектирования стереоскопической картины на экран.

Наиболее простым случаем стереоскопической проекции является непосредственная теневая проекция изображения рассматриваемого объекта на экран без масштабных преобразований его при помощи каких-либо оптических систем. Принципиальная схема такого рода проекции представлена на рис. 239. Система координат нами принята такой, что экран находится в плоскости XOZ , а горизонтальная плоскость XOY расположена так, что в ней лежат центры проекции S_1 и S_2 , а также глаза наблюдателя C_1 и C_2 .

В данном случае линейная перспектива какого-либо предмета, например куба, рисуется на экране лучами, проведенными от одного центра

проекции S_1 , и лучами, проведенными из другого центра проекции S_2 , несколько смещенного в горизонтальном направлении от первого центра.

Полученные на экране две линейные перспективы одного и того же изображения рассматриваются раздельно каждым глазом наблюдателя или с противоположной стороны экрана из точек C_1 и C_2 , как изображено на рисунке (на просвет), или с лицевой стороны экрана (на отражение). В последнем случае получается зеркальное отображение рельефа рассматриваемого предмета.

Обратимся к первому варианту наблюдения стереоскопического изображения, т. е. на просвет, и посмотрим, какова будет кажущаяся форма получаемого пространственного изображения. Для этого вначале определим координаты видимого изображения.

Определение координат видимого изображения точки. Пусть точки S_1, S_2 означают источники света, C_1 и C_2 — глаза наблюдателя. Мы будем предполагать, что прямые S_1S_2 и C_1C_2 параллельны плоскости экрана и плоскости горизонта, причем прямая S_1S_2 находится позади экрана, а прямая C_1C_2 — впереди экрана (считая в направлении от экрана к наблюдателю). Кроме того, мы будем предполагать, что в своем перемещении относительно экрана наблюдатель остается все время в одной плоскости, точнее, середина отрезка C_1C_2 должна при перемещении наблюдателя находиться в одной и той же плоскости, пересекающей плоскость экрана.

Примем теперь за координатную плоскость XOZ плоскость экрана, за плоскость XOY — плоскость, проходящую через прямую C_1C_2 параллельно горизонтальной плоскости, и за плоскость YOZ — плоскость, перпендикулярную к XOY , параллельную плоскости перемещения наблюдателя и проходящую через середину отрезка S_1S_2 . Положительные направления осей координат указаны на чертеже стрелками (см. рис. 239).

Пусть при выбранной системе координат точки S_1, S_2, C_1 и C_2 обладают следующими координатами:

$$S_1(-S, H, l), S_2(S, H, l), \\ C_1(d-a, -h, 0), C_2(a+d, -h, 0).$$

Таким образом, здесь $2S$ означает расстояние между источниками света, $2a$ — межзрачковое расстояние, H — расстояние источников света от экрана, h — расстояние наблюдателя от экрана, l — расстояние источников света от плоскости XOY (смещение источников света относительно глаз наблюдателя) и d — боковое смещение наблюдателя относительно плоскости YOZ ¹.

¹ Строго говоря, H — расстояние середины O_1 отрезка S_1S_2 от оси Z , а h — расстояние середины отрезка C_1C_2 от оси Z при $l = 0$, так как ось OY может оказаться и не перпендикулярной к оси OX .

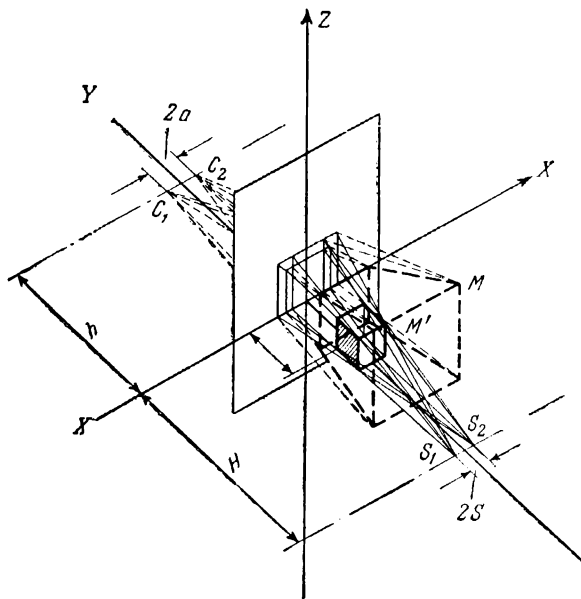


Рис. 239. Принципиальная схема теневой стереопроекции

Возьмем в пространстве точку $M(X, Y, Z)$, находящуюся позади экрана. Лучи S_2M и S_1M , проходящие через точку M , встретят экран в точках A и B . Точки A и B мы будем называть следами точки M . Лучи C_1A и C_2B пересекутся в некоторой точке M' , которую мы назовем видимым изображением точки M . Наша задача состоит в том, чтобы по координатам точки M определять координаты X', Y', Z' ее видимого изображения M' .

Для этой цели найдем координаты следов A и B , для чего составим уравнение прямых S_2M и S_1M .

Уравнение прямой S_2M :

$$\frac{X-x}{S-x} = \frac{Y-y}{H-y} = \frac{Z-z}{l-z}; \quad (1)$$

уравнение прямой S_1M :

$$\frac{X-x}{-S-x} = \frac{Y-y}{H-y} = \frac{Z-z}{l-z}. \quad (2)$$

Обозначая координаты точек A и B соответственно через X_1, Y_1, Z_1 и X_2, Y_2, Z_2 и полагая в уравнениях (1) и (2) $Y_1 = 0$, после простых выкладок получаем

$$X_1 = x - \frac{(S-x)y}{H-y}; \quad Y_1 = 0; \quad Z_1 = z - \frac{(l-z)z}{H-y}; \quad (3)$$

$$X_2 = x + \frac{(S+x)y}{H-y}; \quad Y_2 = 0; \quad Z_2 = Z_1. \quad (4)$$

Теперь, зная величины X_1, Z_1, X_2, Z_2 и $Y_1 = Y_2 = 0$, мы без труда определим координаты видимого изображения, составив уравнения прямых C_1A и C_2B .

Уравнение прямой C_1A

$$\frac{X-X_1}{d-a-X_1} = \frac{Y}{-h} = \frac{Z-Z_1}{-Z_1}, \quad (5)$$

уравнение прямой C_2B

$$\frac{X-X_2}{d+a-X_2} = \frac{Y}{-h} = \frac{Z-Z_1}{-Z_1}. \quad (6)$$

Решаем систему уравнений (5) и (6) совместно, в результате получим следующие координаты точки M' пересечения прямых C_1A и C_2B :

$$X' = \frac{a(X_2 + X_1) - d(X_2 - X_1)}{2a - (X_2 - X_1)}. \quad (7)$$

$$Y' = \frac{h(X_2 - X_1)}{2a - (X_2 - X_1)}, \quad (8)$$

$$Z' = \frac{2aZ_1}{2a - (X_2 - X_1)}. \quad (9)$$

Подставляя в формулы (7), (8), (9) значения X_1, X_2 и Z_1 из формул (3) и (4), после некоторых упрощений получим следующие выражения для X', Y' и Z' :

$$\left. \begin{aligned} X' &= \frac{aHx - Sdy}{aH - (a+S)y}, \\ Y' &= \frac{Shy}{aH - (a+S)y}, \\ Z' &= \frac{aHz - aly}{aH - (a+S)y}. \end{aligned} \right\} \quad (A)$$

Из формул (А) видно, что абсцисса X' и аппликата Z' видимого изображения точки M' не зависят от расстояния h наблюдателя от экрана; от h зависит только Y' . Далее, легко убедиться в том, что дробно-линейное преобразование взаимно однозначно отображает некоторую часть пространства само на себя. В самом деле, уравнения (А) можно однозначно разрешить относительно x, y, z (при $Y' \geq 0$):

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{ShX' + SdY'}{Sh + (a + S)Y'}, \\ y &= \frac{aHY'}{Sh + (a + S)Y'}, \\ z &= \frac{ShZ' + aLY'}{Sh + (a + S)Y'}. \end{aligned} \right\} \quad (A')$$

Условие $Y' \geq 0$ будет выполняться при

$$y < \frac{aH}{a+S}.$$

Затем дробно-линейное преобразование (А) отображает взаимно однозначно плоскость в плоскость (имея в виду соответствующую часть пространства). Действительно, если $AX + BY + CZ + D = 0$ — уравнение некоторой плоскости, то, заменяя X, Y, Z их значениями из формул (А'), будем иметь

$$A'X' + B'Y' + C'Z' + D' = 0, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} A' &= ASH; & B' &= ASd + aBH + aCl + (a + S)D; \\ C' &= ShC; & D' &= DSh. \end{aligned}$$

Наоборот, если $A'X' + B'Y' + C'Z' + D' = 0$, то, применяя преобразование (А), получим снова уравнение плоскости.

Отметим еще, что при дробно-линейном преобразовании (А) плоскость и прямая, перпендикулярные к плоскости XOY , остаются перпендикулярными к XOY . Действительно, уравнение плоскости, перпендикулярной XOY , не содержит текущей координаты Z , и легко видеть, что после преобразования (А) уравнение плоскости не будет содержать Z' . Прямая, перпендикулярная к плоскости XOY , есть не что иное, как линия пересечения двух плоскостей, перпендикулярных к XOY . То же самое наблюдается относительно плоскостей и прямых, параллельных оси OX .

Посмотрим теперь, как трансформируется форма рассматриваемого изображения при перемещении точки наблюдения зрителем. Если зритель будет изменять свое местоположение, не удаляясь от экрана, а только сдвигаясь по горизонталям параллельно плоскости экрана, то искажение формы не должно происходить в вертикальном направлении, и поэтому можно ограничиться рассмотрением искажений проекций только в горизонтальной плоскости.

Для этого рассмотрим возможные деформации проекции точек пространства на плоскость XOY (рис. 240). В этой плоскости лежат центры проекции S_1 и S_2 , глаза наблюдателя C_1 и C_2 .

Дальше мы будем предполагать, что координатный угол XOY может и не быть прямым, такое предположение значительно облегчит математическое представление о возникающих деформациях формы рассматриваемых пространственных изображений.

Обращаясь к преобразованию

$$X' = \frac{aHx - Sdy}{aH - (a + S)y} \quad \text{и} \quad Y' = \frac{Shy}{aH - (a + S)y},$$

мы видим, что при перемещении наблюдателя в направлении, параллельном плоскости YOZ , будет изменяться только ордината Y' проекции P

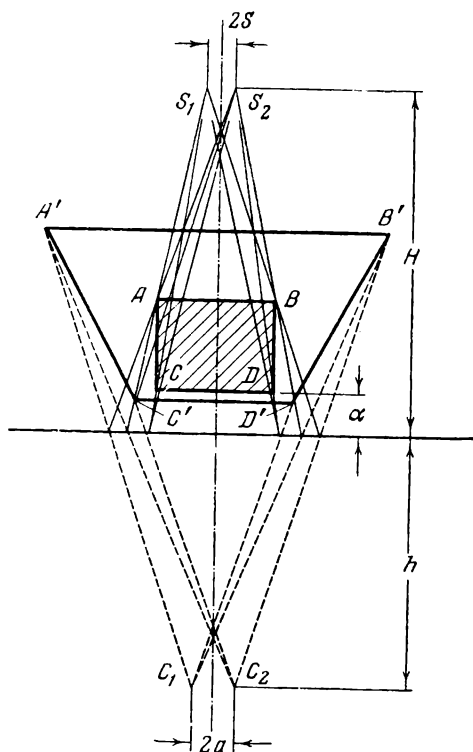


Рис. 240. Схема деформации в плоскости XOY

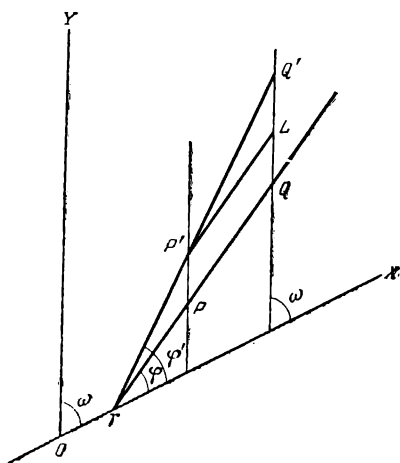


Рис. 241. Вспомогательное построение в плоскости XOY

т. е. получилась прямая, у которой угловой коэффициент в v раз больше, чем угловой коэффициент первоначальной прямой.

Пусть рассматриваемая прямая $Y' = kX' + m$ пересекает ось X в точке T . При линейном преобразовании (B) прямая, как мы только что

видимого изображения точки пространства, а абсцисса будет оставаться неизменной¹. Ордината Y' увеличится или уменьшится во столько раз, во сколько увеличится или уменьшится h .

Короче говоря, при указанном перемещении наблюдателя точка P будет как бы двигаться вдоль прямой

$$X' = X_0 \left(X_0' = \frac{aHx - Sdy}{aH - (a + S)y} \right),$$

параллельной оси ординат; при приближении к экрану точка P будет также приближаться к экрану, а при удалении наблюдателя — удаляться.

Отметим еще, что точки, лежащие на оси X , будут неподвижными, и это будут, очевидно, единственные неподвижные точки. Из всего сказанного видно что полуплоскость $Y' = 0$, $Y' = \infty$, содержащая точку P , претерпевает как бы растяжение или сжатие в направлении перемещения наблюдателя. Такого рода деформацию полуплоскости мы будем в дальнейшем называть *стереоскопической деформацией*.

Стереоскопическая деформация полуплоскости $Y' = 0$, $Y' = \infty$ вполне характеризуется линейным невырождающимся преобразованием

$$\bar{X}' = X; \quad \bar{Y}' = Yv, \quad (B)$$

где $v = h_1 : h_2$ — отношение новой ординаты точек C_1 и C_2 к старой; \bar{X}' , \bar{Y}' — координаты точки P после соответствующего перемещения наблюдателя.

Линейное преобразование (B) прямую переводит в прямую, а окружность — в эллипс. В самом деле, если $Y = kX + m$ — уравнение некоторой прямой, то, подставляя вместо X , Y величины \bar{X}' , \bar{Y}' , получаем

$$\frac{\bar{Y}'}{v} = k\bar{X}' + m, \quad \bar{Y}' = kv\bar{X}' + mv,$$

¹ Здесь и ниже x , y предполагаются постоянными величинами.

выявили, перейдет в прямую $\bar{Y}' = kv\bar{X}' + mv$, а точка T останется на месте, так как T лежит на оси X . Возьмем теперь на нашей прямой некоторый отрезок PQ (рис. 241). При линейном преобразовании (B) отрезок PQ превратится в отрезок $P'Q'$, причем концы P и Q отрезка будут скользить по неподвижным прямым, параллельным оси Y .

Итак, при стереоскопических деформациях прямая вращается вокруг точки T пересечения ее с осью X , а отрезок PQ на этой прямой деформируется, скользя своими концами по неподвижной прямой, параллельной оси Y .

Выясним, как будет изменяться угол наклона φ прямой к оси X и длина отрезка PQ при стереоскопических деформациях.

В случае косоугольной декартовой системы координат тангенс угла наклона прямой к оси X выражается по следующей формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{k \sin \omega}{1 + k \cos \omega}, \quad (11)$$

где ω — координатный угол. После линейного преобразования k должна перейти в $k' = kv$. Таким образом, после линейного преобразования (B) будем иметь:

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{kv \sin \omega}{1 + kv \cos \omega}. \quad (12)$$

Чтобы обнаружить закон изменения длины l отрезка PQ , проведем через точку P' прямую $P'L$, параллельную PQ , и рассмотрим треугольник $P'Q'L$. В этом треугольнике $\angle P'Q'L = \omega - \varphi'$; $\angle Q'LP' = \pi - \omega + \varphi$ (см, рис. 240). Отсюда, обозначая длину отрезка после стереоскопической деформации через $P'Q' = l'$ на основании теоремы синусов, получаем:

$$\frac{l'}{\sin \widehat{P'Q'L}} = \frac{\sin \widehat{P'Q'L}}{\sin (\omega - \varphi')} = \frac{\sin [\pi - (\omega - \varphi)]}{\sin (\omega - \varphi')}, \quad \frac{l'}{l} = \frac{\sin (\omega - \varphi)}{\sin (\omega - \varphi')}. \quad (13)$$

Но, как известно, угловой коэффициент k связан с углом наклона φ прямой к оси X следующим соотношением:

$$k = \frac{\sin \varphi}{\sin (\omega - \varphi)};$$

поэтому

$$k' = kv = \frac{\sin \varphi'}{\sin (\omega - \varphi')}.$$

Отсюда получаем:

$$\sin (\omega - \varphi) = \frac{\sin \varphi}{k}, \quad \sin (\omega - \varphi') = \frac{\sin \varphi'}{kv}.$$

откуда находим:

$$\frac{l'}{l} = \frac{\sin \varphi}{k} : \frac{\sin \varphi'}{kv} = \frac{v \sin \varphi}{\sin \varphi'}.$$

Выразим $\sin \varphi$ и $\sin \varphi'$ через k :

$$\sin \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \varphi}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1 + k \cos \omega}{k \sin \omega} \right)^2}} = \frac{k \sin \omega}{\sqrt{k^2 + 2k \cos \omega + 1}}, \quad (14)$$

$$\sin \varphi' = \frac{kv \sin \omega}{\sqrt{k^2 v^2 + 2kv \cos \omega + 1}}. \quad (15)$$

Таким образом мы можем написать.

$$\frac{l'}{l} = \sqrt{\frac{k^2 v^2 + 2kv \cos \omega + 1}{k^2 + 2k \cos \omega + 1}}, \quad (16)$$

в частности, при $\omega = 90^\circ$:

$$\frac{l'}{l} = \sqrt{\frac{k^2 v^2 + 1}{k^2 + 1}}. \quad (17)$$

Рассмотрим теперь деформацию формы пространственного изображения при перемещении зрителя вдоль оси QY , т. е. в случае удаления или приближения зрителей к экрану.

В этом случае для изучения деформаций, получающихся при рассматривании стереоскопических изображений, достаточно обратиться к горизонтальной плоскости XOY и исследовать деформацию изображения этой плоскости.

§ 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ-СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ПЛОСКОСТИ

Пусть дано взаимно однозначное отображение некоторой части плоскости u на некоторую часть плоскости \bar{u} (употребляя фразу «часть плоскости», мы имеем также в виду и несобственную часть, т. е. всю плоскость). Это взаимно однозначное отображение можно охарактеризовать тем, что для каждой точки $M(x, y)$ рассматриваемой части плоскости u справедливы соотношения

$$\bar{x} = f(x, y), \quad \bar{y} = g(x, y),$$

где (\bar{x}, \bar{y}) — координаты соответствующей точки \bar{M} на плоскости \bar{u} . При этом функции f, g будут предполагаться однозначными и непрерывными, а уравнения $\bar{x} = f(x, y)$; $\bar{y} = g(x, y)$ — однозначно разрешаемыми относительно x и y для всех точек рассматриваемой части плоскости u . Кроме того, мы предположим, что функции f, g допускают частные производные первого порядка, непрерывные в рассматриваемой части плоскости u ¹.

Якобиан $\frac{D(f, g)}{D(x, y)}$ будет в дальнейшем обозначаться через δ .

Для того чтобы отображение было взаимно однозначным, необходимо предположить, что δ не равно тождественно нулю.

Обозначим через μ масштаб в точке $\bar{M}(x, y)$ плоскости \bar{u} направления, характеризующегося угловым коэффициентом $\bar{k} = \frac{d\bar{y}}{d\bar{x}}$. Найдем этот масштаб, а также его проекции μ_x и μ_y на оси $O\bar{x}$ и $O\bar{y}$.

Пусть на плоскости u угловому коэффициенту \bar{k} соответствует $k = \frac{dy}{dx}$. Зная k и \bar{k} , нетрудно будет определить μ .

Действительно,

$$\mu = \frac{ds}{d\bar{s}},$$

где ds — дифференциал дуги кривой в точке M ; $d\bar{s}$ — дифференциал дуги соответствующей кривой в точке \bar{M} (первая кривая имеет в точке M касательную с угловым коэффициентом k , а вторая кривая — в точке \bar{M} касательную с угловым коэффициентом \bar{k}). Но, как известно,

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} = \sqrt{1 + k^2} dx; \quad d\bar{s} = \sqrt{d\bar{x}^2 + d\bar{y}^2} = \sqrt{1 + \bar{k}^2} d\bar{x}.$$

¹ Везде прямоугольная система координат.

Следовательно,

$$\mu = \frac{\sqrt{1 + \bar{k}^2}}{\sqrt{1 + k^2}} \cdot \frac{dx}{dx}.$$

В свою очередь

$$\frac{d\bar{x}}{dx} = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} : \frac{dy}{dx} = A + Bk,$$

где

$$A = \frac{\partial f}{\partial x}; \quad B = \frac{\partial f}{\partial y}.$$

Таким образом,

$$\mu = \sqrt{\frac{1 + \bar{k}^2}{1 + k^2}} (A + Bk).$$

Теперь определяем μ_x и μ_y . Очевидно, что если

$$\bar{k} = \operatorname{tg} \bar{\alpha}, \quad \text{то} \quad \mu_x = \mu \cos \bar{\alpha}, \quad \mu_y = \mu \sin \bar{\alpha}.$$

Но

$$\cos \bar{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \bar{k}^2}} \quad \text{и} \quad \sin \bar{\alpha} = \frac{\bar{k}}{\sqrt{1 + \bar{k}^2}}.$$

Следовательно,

$$\mu_x = \frac{A + Bk}{\sqrt{1 + k^2}} \quad \text{и} \quad \mu_y = \frac{A_1 + B_1 k}{\sqrt{1 + k^2}},$$

где

$$A_1 = \frac{\partial g}{\partial x} \quad \text{и} \quad B_1 = \frac{\partial g}{\partial y}.$$

Найденные значения μ_x и μ_y перепишем следующим образом:

$$\mu_x = A \cos \psi + B \sin \psi, \quad \mu_y = A_1 \cos \psi + B_1 \sin \psi, \quad (1)$$

где

$$\cos \psi = \frac{1}{\sqrt{1 + k^2}} \quad \text{и} \quad \sin \psi = \frac{k}{\sqrt{1 + k^2}}.$$

Решая систему уравнений (1) относительно $\cos \psi$ и $\sin \psi$, получаем

$$\cos \psi = \frac{B_1 \mu_x - B \mu_y}{\delta} \quad \text{и} \quad \sin \psi = \frac{-A_1 \mu_x + A \mu_y}{\delta}.$$

Так как $\cos^2 \psi + \sin^2 \psi = 1$, то

$$\frac{(B_1 \mu_x - B \mu_y)^2}{\delta^2} + \frac{(A_1 \mu_x - A \mu_y)^2}{\delta^2} = 1. \quad (2)$$

Раскрывая скобки, группируя члены с одинаковыми μ_x^2 , $\mu_x \mu_y$ и μ_y^2 и освобождаясь от знаменателя, получаем

$$(A_1^2 + B_1^2) \mu_x^2 - 2(A_1 A + B B_1) \mu_x \mu_y + (A^2 + B^2) \mu_y^2 = \delta^2. \quad (3)$$

Будем теперь рассматривать μ_x и μ_y в качестве текущих координат. Тогда уравнение (3) будет уравнением эллипса. В самом деле, подвергнем левую часть уравнения (2), согласно уравнению (3), следующему действительному невырождающемуся линейному преобразованию:

$$x = B_1 \mu_x - B \mu_y; \quad y = A_1 \mu_x - A \mu_y.$$

В результате получим $\frac{x^2}{\delta^2} + \frac{y^2}{\delta^2} = 1$, т. е. квадратичную форму ранга 2 и с указателем (т. е. с числом отрицательных квадратов) равным нулю. Поэтому уравнение (3) есть уравнение эллипса с центром в начале координат, причем главные оси эллипса не будут, вообще говоря, совпадать с осями координат.

Этот эллипс мы назовем эллипсом деформаций в точке \bar{M} . Величина того или иного полудиаметра эллипса деформации будет равна масштабу в точке \bar{M} в направлении этого полудиаметра. В дальнейшем мы увидим, что эллипс деформации вполне характеризует не только масштаб в точке \bar{M} , но и деформацию углов и площадей в этой точке.

Рассмотрим два направления от точки M с угловыми коэффициентами k_1 и k_2 . Обозначим угол между этими направлениями через φ . Пусть на плоскости \bar{y} величинам k_1 , k_2 и φ соответствует \bar{k}_1 , \bar{k}_2 и $\bar{\varphi}$. Так как

$$\bar{k} = \frac{d\bar{y}}{d\bar{x}} = \frac{\frac{\partial g}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dx}}{\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dx}} = \frac{A_1 + B_1 k}{A + B k}, \quad (3a)^1$$

то

$$k_1 = \frac{A\bar{k}_1 - A_1}{B_1 - B\bar{k}_1}, \quad k_2 = \frac{A\bar{k}_2 - A_1}{B_1 - B\bar{k}_2}.$$

Подставляя в формулу $\operatorname{tg} \varphi = \frac{k_1 - k_2}{1 + k_1 k_2}$ эти значения k_1 и k_2 , получаем

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{(\bar{k}_1 - \bar{k}_2) \delta}{(A^2 + B^2) \bar{k}_1 \bar{k}_2 - (A A_1 + B B_1) (\bar{k}_1 + \bar{k}_2) + (A_1^2 + B_1^2)}. \quad (4)$$

Точно так же, подставляя в $\operatorname{tg} \bar{\varphi} = \frac{\bar{k}_1 - \bar{k}_2}{1 + \bar{k}_1 \bar{k}_2}$ значения

$$\bar{k}_1 = \frac{A_1 + B_1 k_1}{A + B k_1}, \quad \bar{k}_2 = \frac{A_1 + B_1 k_2}{A + B k_2},$$

получаем

$$\operatorname{tg} \bar{\varphi} = \frac{(k_1 - k_2) \delta}{(A^2 + A_1^2) + (AB + A_1 B_1) (k_1 + k_2) + (B^2 + B_1^2) k_1 k_2}. \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) числитель и знаменатель не могут одновременно обращаться в нуль. Мы покажем справедливость этого утверждения лишь для формулы (4); для формулы (5) рассуждения будут аналогичными.

Если бы $\bar{k}_1 = \bar{k}_2 = \bar{k}_3$ и знаменатель равнялся при этом нулю, то мы имели бы относительно \bar{k}_3 следующее квадратное уравнение:

$$(A^2 + B^2) \bar{k}_3^2 - 2 (A A_1 + B B_1) \bar{k}_3 + (A_1^2 + B_1^2) = 0.$$

¹ Из этой формулы получается еще раз, что равенство нулю якобиана δ нарушает требование взаимной однозначности отображения. А именно, если $\delta = 0$, то $A_1 = \rho A$, $B_1 = \rho B$ (или $A = \rho A_1$, $B = \rho B_1$, где ρ — множитель пропорциональности). Отсюда следует, что $k \cdot \bar{k} = \rho \left(\text{или } \frac{1}{\rho} \right)$, т. е. два различных направления от точки M будут при отображении сливаться в одно направление, что несовместимо со взаимной однозначностью отображений.

Но это уравнение не имеет действительных корней, так как его дискриминант

$$(AA_1 + BB_1)^2 - (A^2 + B^2) \cdot (A_1^2 + B_1^2)$$

согласно известному тождеству

$$(A^2 + B^2)(A_1^2 + B_1^2) - (AA_1 + BB_1)^2 = (AB_1 - A_1B)^2$$

равен отрицательной величине $-\delta^2$.

Если направления с угловыми коэффициентами k_1 и k_2 от точки M взаимно-перпендикулярны, то в формуле (4) знаменатель должен равняться нулю. Наоборот, если в формуле (4) знаменатель равен нулю, то $\varphi = 90^\circ$, вследствие чего рассматриваемые направления от точки M будут взаимно-перпендикулярны. Но равенство

$$(A^2 + B^2) \bar{k}_1 \bar{k}_2 - (AA_1 + BB_1)(\bar{k}_1 + \bar{k}_2) + (A_1^2 + B_1^2) = 0$$

есть не что иное, как условие сопряженности диаметров эллипса деформации. Таким образом, мы пришли к следующему важному выводу: при взаимно однозначном отображении некоторой части плоскости u на некоторую часть плоскости u два взаимно-перпендикулярных направления из точки M переходят в направления сопряженных диаметров эллипса деформаций, а направления сопряженных диаметров эллипса деформаций всегда соответствуют взаимно-перпендикулярным направлениям исходящим из точки M .

Найдем теперь величину и направление главных осей эллипса деформаций. Для этой цели определим величину сопряженных диаметров, соответствующих направлениям $x = \text{const}$, $y = \text{const}$ из точки M , и угол ψ между этими диаметрами.

При $x = \text{const}$ угловой коэффициент $k_1 = \infty$, а при $y = \text{const}$ получается угловой коэффициент $k_2 = 0$. Отсюда имеем, что $\bar{k}_1 = \frac{B_1}{B}$ и $\bar{k}_2 = \frac{A_1}{A}$.

$$\text{tg } \psi = \frac{\bar{k}_1 - \bar{k}_2}{1 + \bar{k}_1 \bar{k}_2} = \frac{\frac{B_1}{B} - \frac{A_1}{A}}{1 + \frac{A_1 B_1}{AB}} = \frac{\delta}{AB + A_1 B_1}.$$

Обозначим масштабы в точке \bar{M} вдоль направления с угловыми коэффициентами $\bar{k}_1 = \frac{B_1}{B}$ и $\bar{k}_2 = \frac{A_1}{A}$ соответственно через m и n . Руководствуясь формулой

$$\mu = \sqrt{\frac{1 + \bar{k}^2}{1 + k^2}} (A + Bk),$$

получаем для m и n следующие выражения:

$$m = \sqrt{1 + \bar{k}_1^2} \lim_{k_1 \rightarrow \infty} \frac{A + Bk_1}{\sqrt{1 + k_1^2}} = \sqrt{1 + \frac{B_1^2}{B^2}} \cdot B = \sqrt{B^2 + B_1^2}.$$

Равным образом

$$n = \sqrt{A^2 + A_1^2}.$$

Очевидно, что m и n суть длины сопряженных полуосей эллипса деформаций, соответствующих направлениям $x = \text{const}$, $y = \text{const}$ из точки M . Обозначим теперь через a и b длины полуосей эллипса деформаций; согласно первой теореме Аполлония

$$m^2 + n^2 = a^2 + b^2. \quad (6)$$

Согласно второй теореме Аполлония

$$mn \sin \psi = ab,$$

или

$$\frac{\sqrt{(A^2 + A_1^2)(B^2 + B_1^2)}}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \psi}} = ab$$

и

$$\sqrt{\frac{(A^2 + A_1^2)(B^2 + B_1^2) \delta^2}{(AB + A_1 B_1)^2 + \delta^2}} = ab.$$

Так как

$$(A^2 + A_1^2)(B^2 + B_1^2) = (AB + A_1 B_1)^2 + (AB_1 - A_1 B)^2 = (AB + A_1 B_1)^2 + \delta^2,$$

отсюда получаем:

$$\delta = \pm ab. \quad (7)$$

Прибавляя и вычитая из обеих частей уравнения (6) обе части уравнения (7), увеличенные вдвое, получаем:

$$(a + b)^2 = (A^2 + B^2) + (A_1^2 + B_1^2) \pm 2\delta \text{ (знак плюс при } \delta > 0, \text{ минус при } \delta < 0),$$

$$(a - b)^2 = (A^2 + B^2) + (A_1^2 + B_1^2) \mp 2\delta \text{ (знак минус при } \delta > 0, \text{ плюс при } \delta < 0),$$

откуда находим:

$$\begin{aligned} a - b &= \sqrt{(A^2 + B^2) + (A_1^2 + B_1^2 \mp 2\delta)}, \\ a + b &= \sqrt{(A^2 + B^2) + (A_1^2 + B_1^2 \pm 2\delta)}. \end{aligned}$$

Полученные выражения можно несколько преобразовать. А именно:

$$\begin{aligned} a \mp b &= \sqrt{(A^2 + B^2) + (A_1^2 + B_1^2) \pm 2(AB_1 - A_1 B)} = \\ &= \sqrt{(A^2 \pm 2AB_1 + B_1^2) + (A_1^2 \mp 2A_1 B + B^2)} = \sqrt{(A \pm B_1)^2 + (A_1 \mp B)^2}. \end{aligned}$$

Аналогично получаем:

$$a - b = \sqrt{(A \mp B_1)^2 + (A_1 \pm B)^2}.$$

Отсюда находим

$$\begin{aligned} a &= \frac{\sqrt{(A \pm B_1)^2 + (A_1 \mp B)^2} + \sqrt{(A \mp B_1)^2 + (A_1 \pm B)^2}}{2}, \\ b &= \frac{\sqrt{(A \pm B_1)^2 + (A_1 \mp B)^2} - \sqrt{(A \mp B_1)^2 + (A_1 \pm B)^2}}{2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Двойные знаки поставлены в соответствии со знаком δ (см. выше).

Если соответствие между рассматриваемыми частями плоскостей u и \bar{u} прямое, то $\delta > 0$. Поэтому, предполагая отныне соответствие прямым, мы можем упростить формулы (8):

$$\begin{aligned} a &= \frac{\sqrt{(A + B_1)^2 + (A_1 - B)^2} + \sqrt{(A - B_1)^2 + (A_1 + B)^2}}{2}, \\ b &= \frac{\sqrt{(A + B_1)^2 + (A_1 - B)^2} - \sqrt{(A - B_1)^2 + (A_1 + B)^2}}{2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Остается установить направление главных осей эллипса деформаций.

Обращаемся к формуле (5). Для главных осей эллипса деформаций $\bar{\varphi} = 90^\circ$ и $k_2 = -\frac{1}{k_1}$. Отсюда следует, что

$$(A^2 + A_1^2) + (AB + A_1B_1) \left(k - \frac{1}{k} \right) - (B^2 + B_1^2) = 0$$

или

$$(AB + A_1B_1)k^2 + (A^2 + A_1^2 - B^2 - B_1^2)k - (AB + A_1B_1) = 0.$$

Решаем это квадратное уравнение:

$$k = \frac{[(B^2 + B_1^2) - (A^2 + A_1^2)] \pm \sqrt{[(B^2 + B_1^2) - (A^2 + A_1^2)]^2 + 4(AB + A_1B_1)^2}}{2(AB + A_1B_1)},$$

но

$$\begin{aligned} & (AB + A_1B_1)^2 - (A^2 + A_1^2)(B^2 + B_1^2) = \delta^2; \\ & [(B^2 + B_1^2) - (A^2 + A_1^2)]^2 + 4(AB + A_1B_1)^2 = [(B^2 + B_1^2) - (A^2 + A_1^2)]^2 + \\ & + 4(A^2 + A_1^2)(B^2 + B_1^2) - 4\delta^2 = (B^2 + B_1^2)^2 - 2(A^2 + A_1^2)(B^2 + B_1^2) + \\ & + (A^2 + A_1^2)^2 + 4(A^2 + A_1^2)(B^2 + B_1^2) - 4\delta^2 = \\ & = [(A^2 + A_1^2)^2 + 2(A^2 + A_1^2)(B^2 + B_1^2) + (B^2 + B_1^2)^2] - 4\delta^2 = \\ & = [(A^2 + A_1^2) + (B^2 + B_1^2)]^2 - 4\delta^2. \end{aligned}$$

Таким образом получаем:

$$\begin{aligned} & \sqrt{[(B^2 + B_1^2) - (A^2 + A_1^2)]^2 + 4(AB + A_1B_1)^2} = \\ & = \sqrt{[(A^2 + B^2) + (A_1^2 + B_1^2)]^2 - 4\delta^2}. \end{aligned}$$

В свое время мы установили, что

$$\begin{aligned} a + b &= \sqrt{(A^2 + B^2) + (A_1^2 + B_1^2) \pm 2\delta}, \\ a - b &= \sqrt{(A^2 + B^2) + (A_1^2 + B_1^2) \mp 2\delta}. \end{aligned}$$

Следовательно:

$$\sqrt{[(B^2 + B_1^2) - (A^2 + A_1^2)]^2 + 4(AB + A_1B_1)^2} = a^2 - b^2.$$

Отсюда находим:

$$k = \frac{(B^2 + B_1^2) - (A^2 + A_1^2) \pm (a^2 - b^2)}{2(AB + A_1B_1)}.$$

Полученное выражение можно еще более упростить, если принять во внимание, что

$$A^2 + A_1^2 = n^2 \quad \text{и} \quad B^2 + B_1^2 = m^2.$$

А именно, получаем:

$$k = \frac{(m^2 + n^2) - 2n^2 \pm (a^2 - b^2)}{2(AB + A_1B_1)},$$

т. е.

$$k_1 = \frac{a^2 - n^2}{AB + A_1B_1} \quad \text{и} \quad k_2 = -\frac{n^2 - b^2}{AB + A_1B_1}. \quad (10)$$

Знак k_1 , очевидно, должен совпадать со знаком $AB + A_1B_1$, так как $a > n$.

Покажем, что k_1 есть угловой коэффициент большой оси эллипса деформаций.

Так как вдоль большой оси масштаб $\mu = a$, то, принимая во внимание формулу $\mu = \sqrt{\frac{1+\bar{k}^2}{1+k^2}} (A+Bk)$ и формулу $\bar{k} = \frac{A_1+B_1k}{A+Bk}$, получаем:

$$\begin{aligned} \frac{1+\bar{k}^2}{1+k^2} (A+Bk)^2 &= a^2; & \frac{(A+Bk)^2 + (A_1+B_1k)^2}{1+k^2} &= a^2, \\ (B^2 + B_1^2 - a^2)k^2 + 2(AB + A_1B_1)k + (A^2 + A_1^2 - a^2) &= 0, \\ -(a^2 - m^2)k^2 + 2(AB + A_1B_1)k - (a^2 - n^2) &= 0, \\ (a^2 - m^2)k^2 - 2[(AB + A_1B_1)k + (a^2 - n^2)] &= 0. \end{aligned}$$

Так как $a^2 - m^2 = n^2 - b^2$, то

$$(n^2 - b^2)k^2 - 2(AB + A_1B_1)k + (a^2 - n^2) = 0. \quad (11)$$

Выразим $AB + A_1B_1$ через a, b, n и так как $k_1k_2 = -1$, то

$$k_1k_2 = -\frac{(a^2 - n^2)(n^2 - b^2)}{(AB + A_1B_1)^2} = -1, \quad (AB + A_1B_1)^2 = (a^2 - n^2)(n^2 - b^2).$$

Отсюда находим:

$$AB + A_1B_1 = \pm \sqrt{(a^2 - n^2)(n^2 - b^2)},$$

вследствие чего

$$k_1 = \pm \sqrt{\frac{a^2 - n^2}{n^2 - b^2}} \quad \text{и} \quad k_2 = \pm \sqrt{\frac{n^2 - b^2}{a^2 - n^2}}, \quad (12)$$

причем в правой части равенства (12) при $AB + A_1B_1 > 0$ перед радикалом следует брать знак плюс, а при $AB + A_1B_1 < 0$ — знак минус. А теперь, подставляя значение k_1 из формулы (12) в левую часть уравнения (11), получаем тождество. Следовательно, k_1 есть не что иное, как угловой коэффициент большой оси эллипса деформаций. Пусть большая ось эллипса искажения образует с положительным направлением оси абсцисс угол, равный α . Тогда на основании формулы (12), будем иметь:

$$k_1 = \operatorname{tg} \alpha = \pm \sqrt{\frac{a^2 - n^2}{n^2 - b^2}}.$$

Напишем уравнение эллипса деформаций, отнесенное к главным осям:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1. \quad (13)$$

Как известно, прямая, проходящая через точку M плоскости и параллельно оси x , при отображении переходит в прямую, проходящую через точку \bar{M} плоскости \bar{u} , причем угловой коэффициент этой прямой должен равняться $\frac{A_1}{A}$. Масштаб вдоль этой прямой выше мы обозначили через n . Пусть $\bar{\alpha}$ обозначает угол, образуемый большой осью эллипса деформаций с этой прямой. Тогда, обозначив координаты точки пересечения рассматриваемой прямой с эллипсом деформаций через (x, y) , будем иметь

$$x = n \cos \bar{\alpha} \quad \text{и} \quad y = -n \sin \bar{\alpha}.$$

Подставляя эти значения (x, y) в уравнение (13), получаем

$$n^2 (b^2 \cos^2 \bar{\alpha} + a^2 \sin^2 \bar{\alpha}) = a^2 b^2.$$

Таким образом, полагая $\operatorname{tg} \bar{\alpha} = z$, получаем

$$\sin^2 \bar{\alpha} = \frac{z^2}{1+z^2} \quad \text{и} \quad \cos^2 \bar{\alpha} = \frac{1}{1+z^2},$$

$$n^2 \left(\frac{b^2}{1+z^2} + \frac{a^2 z^2}{1+z^2} \right) = a^2 b^2,$$

$$a^2 (n^2 - b^2) z^2 = b^2 (a^2 - n^2),$$

$$z = \pm \frac{b}{a} \sqrt{\frac{a^2 - n^2}{n^2 - b^2}},$$

т. е.

$$\operatorname{tg} \bar{\alpha} = \pm \frac{b}{a} \operatorname{tg} \alpha.$$

Чтобы установить, с каким знаком следует брать $\frac{b}{a} \operatorname{tg} \alpha$, вычислим $\operatorname{tg} \bar{\alpha}$ по формуле (5). В данном случае

$$k_1 = \frac{a^2 - n^2}{AB + A_1 B_1} \quad \text{и} \quad k_2 = 0.$$

Поэтому

$$\operatorname{tg} \bar{\alpha} = \frac{(a^2 - n^2) \delta}{(AB + A_1 B_1) [(A^2 + A_1^2) + (a^2 - n^2)]},$$

так как $a^2 - n^2 > 0$ и $(A^2 + A_1^2) + (a^2 - n^2) > 0$, то знак $\operatorname{tg} \bar{\alpha}$ должен совпадать со знаком отношения

$$\frac{\delta}{AB + A_1 B_1}.$$

Но знак $\operatorname{tg} \alpha$, как было выше установлено, должен совпадать со знаком $AB + A_1 B_1$. Следовательно, для $\operatorname{tg} \bar{\alpha}$ получается тот же знак, что и у δ , т. е. при

$$\delta > 0, \operatorname{tg} \bar{\alpha} = \frac{b}{a} \operatorname{tg} \alpha, \quad \text{а при} \quad \delta < 0, \operatorname{tg} \bar{\alpha} = -\frac{b}{a} \operatorname{tg} \alpha.$$

Итак, ориентацию главных осей эллипса деформаций можно считать установленной.

Теперь перейдем к рассмотрению вопроса о деформации углов.

Обозначим через χ_0 угол между прямыми ML и MN (отсчет ведется от прямой ML), где MN при отображении переходит в большую ось \overline{MN} эллипса деформаций, а ML — в некоторую прямую \overline{ML} . Пусть χ_0 отображается в угол χ , а μ означает масштаб в точке \bar{M} в направлении \overline{ML} . Повернем на плоскости u оси координат так, чтобы ось абсцисс была параллельна прямой ML . Тогда μ будет играть роль n , χ_0 — роль α и χ — роль $\bar{\alpha}$. На основании предыдущего мы получаем, что при $\delta_1 > 0$

$$\operatorname{tg} \chi = \frac{b}{a} \operatorname{tg} \chi_0,$$

при $\delta_1 < 0$

$$\operatorname{tg} \chi = -\frac{b}{a} \operatorname{tg} \chi_0.$$

Причем δ_1 значение якобиана после указанного выше поворота осей координат, а

$$\operatorname{tg} \chi_0 = \pm \sqrt{\frac{a^2 - \mu^2}{\mu^2 - b^2}}.$$

Выясним, чему равно δ_1 и какой знак имеет $\operatorname{tg} \chi_0$. Напишем формулу поворота осей координат на угол φ :

$$x = x' \cos \varphi - y' \sin \varphi; \quad y = x' \sin \varphi + y' \cos \varphi,$$

где x' , y' — координаты точки M после поворота. Обозначим через $f_1(x', y')$ функцию

$$f(x' \cos \varphi - y' \sin \varphi, \quad x' \sin \varphi + y' \cos \varphi),$$

через $g_1(x', y')$ — функцию

$$g(x' \cos \varphi - y' \sin \varphi, \quad x' \sin \varphi + y' \cos \varphi).$$

Тогда, пользуясь известным свойством функциональных определителей, можем написать, что

$$\delta_1 = \frac{D(f_1, g_1)}{D(x', y')} = \frac{D(f_1, g_1)}{D(x, y)} \cdot \frac{D(x, y)}{D(x', y')} = \delta (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) = \delta,$$

т. е. якобиан δ инвариантен относительно поворота осей координат. Знак $\operatorname{tg} \chi_0$ совпадает со знаком $A'B' + A_1B_1'$, где

$$A' = \frac{\partial f_1}{\partial x'}; \quad B' = \frac{\partial f_1}{\partial y'}; \quad A_1' = \frac{\partial g_1}{\partial x'}; \quad B_1' = \frac{\partial g_1}{\partial y'}.$$

Так, при $\delta > 0$

$$\operatorname{tg} \chi = \frac{b}{a} \operatorname{tg} \chi_0,$$

при $\delta < 0$

$$\operatorname{tg} \chi = -\frac{b}{a} \operatorname{tg} \chi_0,$$

причем

$$\operatorname{tg} \chi_0 = \pm \sqrt{\frac{a^2 - \mu^2}{\mu^2 - b^2}},$$

$$A' = \frac{\partial f_1}{\partial x'} = \frac{\partial f}{\partial x'} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x'} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial x'} = A \cos \varphi + B \sin \varphi;$$

$$B' = \frac{\partial f}{\partial y'} = \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial y'} + \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial y'} = B \cos \varphi - A \sin \varphi.$$

Аналогично получаем

$$A_1' = A_1 \cos \varphi + B_1 \sin \varphi \quad \text{и} \quad B_1' = B_1 \cos \varphi - A_1 \sin \varphi.$$

Отсюда находим:

$$\begin{aligned}
 A'B' + A_1'B_1' &= (A \cos \varphi + B \sin \varphi)(B \cos \varphi - A \sin \varphi) + \\
 &+ \cos \varphi + B_1 \sin \varphi)(B_1 \cos \varphi - A_1 \sin \varphi) = (AB + A_1B_1)(\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi) + \\
 &+ (B^2 + B_1^2 - A^2 - A_1^2) \cos \varphi \sin \varphi = (AB + A_1B_1) \cos 2\varphi + \\
 &+ \frac{m^2 - n^2}{2} \sin 2\varphi = (AB + A_1B_1) \cos 2\varphi + \frac{(a^2 - n^2) + (b^2 - n^2)}{2} \sin 2\varphi = \\
 &= (AB + A_1B_1) \cos 2\varphi + \frac{(a^2 - n^2) + (b^2 - n^2)}{2(AB + A_1B_1)} (AB + A_1B_1) \sin 2\varphi = \\
 &= (AB + A_1B_1) \sin 2\varphi \left[\operatorname{ctg} 2\varphi + \frac{(a^2 - n^2) + (b^2 - n^2)}{2(AB + A_1B_1)} \right] = \\
 &= (AB + A_1B_1) \sin 2\varphi \left[\operatorname{ctg} 2\varphi + \frac{k_1 - \frac{1}{k_1}}{2} \right] = (AB + A_1B_1) \sin 2\varphi (\operatorname{ctg} 2\varphi - \\
 &- \operatorname{ctg} 2\alpha) = \\
 &= \frac{(AB + A_1B_1) \sin 2\varphi \sin 2(\alpha - \varphi)}{\sin 2\varphi \cdot \sin 2\alpha} = (AB + A_1B_1) \frac{\sin 2(\alpha - \varphi)}{\sin 2\alpha}.
 \end{aligned}$$

Итак, знак при $\operatorname{tg} \chi_0$ совпадает со знаком $(AB + A_1B_1) \frac{\sin 2(\alpha - \varphi)}{\sin 2\alpha}$, где α — угол, образуемый прямой ML с осью x (до поворота осей координат), и φ — угол, образуемый прямой ML с той же осью абсцисс.

Очевидно, что деформацию направления ML вполне можно охарактеризовать разностью $\chi_0 - \chi$, а также $\operatorname{tg}(\chi_0 - \chi)$.

Разберем два случая.

1. $\delta > 0$. В этом случае, как мы уже знаем, $\operatorname{tg} \chi = \frac{b}{a} \operatorname{tg} \chi_0$.

Отсюда получаем:

$$\operatorname{tg}(\chi_0 - \chi) = \frac{(a - b) \operatorname{tg} \chi_0}{a + b \operatorname{tg}^2 \chi_0}.$$

Обозначим через ω максимальное значение деформации угла. Находим, чему равно ω :

$$\frac{d \operatorname{tg}(\chi_0 - \chi)}{d \chi_0} = \frac{(a - b)(a - b \operatorname{tg}^2 \chi_0)}{(a + b \operatorname{tg}^2 \chi_0)^2 \cos^2 \chi_0} = 0.$$

Отсюда получаем:

$$a - b \operatorname{tg}^2 \chi_0 = 0; \quad \operatorname{tg} \chi_0 = \pm \sqrt{\frac{a}{b}}; \quad \operatorname{tg} \chi = \frac{b}{a} \operatorname{tg} \chi_0 = \pm \sqrt{\frac{b}{a}} = \operatorname{ctg} \chi_0,$$

т. е. $\chi + \chi_0 = 90^\circ$, $\omega = 90^\circ$. Легко убедиться в том, что

$$\operatorname{tg} \omega = \pm \frac{a - b}{2 \sqrt{ab}}.$$

2. $\delta < 0$. В этом случае

$$\operatorname{tg} \chi = -\frac{b}{a} \operatorname{tg} \chi_0, \quad \operatorname{tg}(\chi_0 - \chi) = \frac{(a + b) \operatorname{tg} \chi_0}{a - b \operatorname{tg}^2 \chi_0}.$$

Определяем максимальное значение ω деформации угла:

$$\frac{d \operatorname{tg}(\chi_0 - \chi)}{d \chi_0} = \frac{(a + b)(a + b \operatorname{tg}^2 \chi_0)}{\cos^2 \chi_0 (a - b \operatorname{tg}^2 \chi_0)^2}.$$

Максимум получается только при $a - b \operatorname{tg}^2 \chi_0 = 0$, откуда

$$\operatorname{tg} \chi_0 = \pm \sqrt{\frac{a}{b}}; \quad \operatorname{tg} \chi = -\operatorname{ctg} \chi_0,$$

т. е.

$$\chi - \chi_0 = 90^\circ, \quad \omega = -90^\circ.$$

Применим изложенное выше к отображениям, не меняющим величину угла (равноугольные или конформные отображения). Если отображение является конформным, то всегда $\operatorname{tg} \chi = \operatorname{tg} \chi_0$, что возможно лишь при $\delta > 0$ и $a = b$.

Пусть $\delta > 0$ и $a = b$, тогда $a - b = \sqrt{(A - B_1)^2 + (A_1 + B)^2} = 0$ (см. стр. 356).

Откуда находим:

$$\delta = AB_1 - A_1B = A^2 + B^2 = A^2 + A_1^2 = B^2 + B_1^2,$$

так как

$$A = B_1, \quad A_1 = -B \quad \text{и} \quad AB + A_1B_1 = AB - BA = 0.$$

Поэтому формула (5) принимает вид:

$$\operatorname{tg} \bar{\varphi} = \frac{(k_1 - k_2)(A^2 + B^2)}{(A^2 + B^2)(1 + k_1k_2)} = \frac{k_1 - k_2}{1 + k_1k_2} = \operatorname{tg} \varphi_1; \quad \bar{\varphi} = \varphi_1.$$

Это значит, что для того, чтобы отображение было конформным, необходимо и достаточно, чтобы эллипс деформаций был окружностью.

Очевидно, что условия $\frac{\partial \bar{x}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{y}}{\partial y}$ и $\frac{\partial \bar{y}}{\partial x} = -\frac{\partial \bar{x}}{\partial y}$ являются необходимыми и достаточными условиями конформности отображения.

Введем теперь понятие коэффициента деформации площадей в точке $\bar{M}(\bar{x}, \bar{y})$. Возьмем на плоскости u замкнутую область S ; внутри S пусть лежит точка $M(x, y)$. Пусть при отображении область S переходит в область \bar{S} внутренней точкой $\bar{M}(\bar{x}, \bar{y})$. Назовем средней деформацией области отношение

$$v_c = \frac{\iint_{(\bar{S})} d\bar{x} d\bar{y}}{\iint_{(S)} dx dy}.$$

Заменим переменные \bar{x}, \bar{y} через x, y . Получим в результате:

$$v_c = \frac{\iint_{(\bar{S})} \delta dx dy}{\iint_{(S)} dx dy}, \quad \text{где} \quad \delta = \frac{D(\bar{x}, \bar{y})}{D(x, y)}.$$

Применяя к двойному интегралу в числителе теорему о среднем значении, получаем:

$$\iint_{(\bar{S})} \delta dx dy = \delta(\xi, \eta) \cdot \iint_{(S)} dx dy,$$

откуда

$$v_c = \delta(\xi, \eta),$$

где ξ, η — координаты точки, находящейся внутри.

Будем теперь область S неограниченно уменьшать, стягивая ее в точку M . Тогда получим так называемый коэффициент деформации площадей в точке M (или \bar{M}) или масштаб площадей в точке M (или \bar{M}), причем $v = \lim v_c = \delta(x, y)$. Итак, абсолютная величина якобиана есть не что иное, как масштаб площадей в точке M .

В свое время было установлено, что $\delta = ab$. Таким образом, масштаб площадей в точке M равен произведению линейных масштабов в

этой точке по главным направлениям (т. е. по главным осям эллипса деформаций).

В заключение этого параграфа применим наши выводы к дробно-линейным преобразованиям (А) § 4. Чтобы можно было сделать достаточно отчетливое суждение о характере деформации стереоскопических изображений, рассмотрим деформации, возникающие на плоскостях, параллельных плоскости экрана (т. е. плоскости ZOX), а также деформации проекции точек пространства на плоскость XOY .

И. Итак, пусть $y = \text{const} = c$ ($0 < c < \frac{aH}{a+S}$) — некоторая плоскость, параллельная плоскости экрана. Покажем, что при дробно-линейных преобразованиях (А) § 4 получается конформное отображение рассматриваемой плоскости на плоскость $y' = c'$, $c' = \frac{Shc}{aH - (a+S)c}$, параллельную плоскости экрана.

В самом деле, в качестве прямоугольной системы координат возьмем на плоскостях $y = c$ и $y' = c'$ следы плоскостей YOZ и XOY (плоскость экрана у нас все время предполагается вертикальной). Тогда взаимно однозначное отображение плоскости $y = c$ на плоскость $y' = c'$ будет определяться следующими преобразованиями:

$$x' = \frac{aHx - Sdc}{aH - (a+S)c} \quad \text{и} \quad z' = \frac{aHz - alc}{aH - (a+S)c},$$

где x, z — координаты точки плоскости $y = c$, а x', z' — координаты соответствующей точки плоскости $y = c$.

Отсюда находим:

$$A = \frac{\partial x'}{\partial x} = \frac{aH}{aH - (a+S)c}; \quad B = \frac{\partial x'}{\partial z} = 0;$$

$$A_1 = \frac{\partial z'}{\partial x} = 0; \quad B_1 = \frac{\partial z'}{\partial z} = \frac{aH}{aH - (a+S)c}.$$

Легко видеть, что условие конформности соблюдается:

$$A = B_1, \quad A_1 = -B.$$

Якобиан

$$\delta = \frac{a^2 H^2}{[aH - (a+S)c]^2} > 0,$$

вследствие чего отображение является прямым. Масштаб

$$\mu = \sqrt{A^2 + B^2} = A = \frac{aH}{aH - (a+S)c},$$

т. е. одинаков во всех точках плоскости.

II. Рассмотрим теперь проекции на плоскость XOY точек той части пространства, которая заключена между плоскостью $y = 0$ (плоскость экрана) и

$$y = \frac{aH}{a+S}.$$

Ограничимся тем случаем, когда оси OX и OY взаимно-перпендикулярны. Дробно-линейное преобразование (А) § 4 взаимно однозначно отображает рассматриваемую часть пространства, расположенную за плоскостью экрана. Тем самым у нас получается взаимно однозначное отображение полосы $y = 0, y = \frac{aH}{a+S}$ плоскости XOY на полуплоскость

$y' = 0$, $y' = \infty$. Последнее отображение будет определяться следующими преобразованиями:

$$x' = \frac{aHx - Sdy}{aH - (a + S)y}, \quad y' = \frac{Shy}{aH - (a + S)y}.$$

Отсюда следует:

$$A = \frac{\partial x'}{\partial x} = \frac{aH}{aH - (a + S)y}; \quad B = \frac{\partial x'}{\partial y} = \frac{(a + S)aHx - SdaH}{[aH - (a + S)y]^2};$$

$$A_1 = \frac{\partial y'}{\partial x} = 0; \quad B_1 = \frac{\partial y'}{\partial y} = \frac{aHSh}{[aH - (a + S)y]^2}.$$

Таким образом, получаем:

$$\delta = AB_1 - A_1B = \frac{a^2H^2Sh}{[aH - (a + S)y]^3} > 0.$$

Это значит, что при данных условиях отображение является прямым. Вместе с тем легко убедиться в том, что условия конформности не соблюдаются.

Найдем полуоси эллипса деформаций. Производя выкладки по формулам (9), после некоторых преобразований получаем¹

$$\alpha = \frac{aH(a + S)}{[aH - (a + S)y]^2} \cdot \frac{\sqrt{\left(y - \frac{aH + Sh}{a + S}\right)^2 + \left(x + \frac{Sd}{a + S}\right)^2} + \sqrt{\left(y - \frac{aH - Sh}{a + S}\right)^2 + \left(x - \frac{Sd}{a + S}\right)^2}}{2},$$

$$\beta = \frac{aH(a + S)}{[aH - (a + S)y]^2} \cdot \frac{\sqrt{\left(y - \frac{aH + Sh}{a + S}\right)^2 + \left(x + \frac{Sh}{a + S}\right)^2} - \sqrt{\left(y - \frac{aH - Sh}{a + S}\right)^2 + \left(x - \frac{Sh}{a + S}\right)^2}}{2}.$$

Обозначим расстояние от точки $R(0, y)$ до точек

$$P\left(\frac{Sd}{a + S}; \frac{aH - Sh}{a + S}\right)$$

и

$$Q\left(-\frac{Sd}{a + S}; \frac{aH + Sh}{a + S}\right)$$

соответственно через r_2 и r_1 .

Тогда будем иметь окончательно

$$\alpha = \frac{aH(a + S)}{[aH - (a + S)y]^2} \cdot \frac{r_1 + r_2}{2}$$

и

$$\beta = \frac{aH(a + S)}{[aH - (a + S)y]^2} \cdot \frac{r_1 - r_2}{2}.$$

Из найденных значений α и β трудно вывести, что при $y \rightarrow \frac{aH}{a + S}$ полуоси эллипса деформаций неограниченно увеличиваются, причем большая полуось есть бесконечно большая величина более высокого порядка: $\lim \frac{\alpha}{\beta} = \infty$ при $y \rightarrow \frac{aH}{a + S}$. Таким образом, по мере удаления наблюдаемого объекта от экрана деформации весьма интенсивно возрастают, что наглядно представлено на рис. 242.

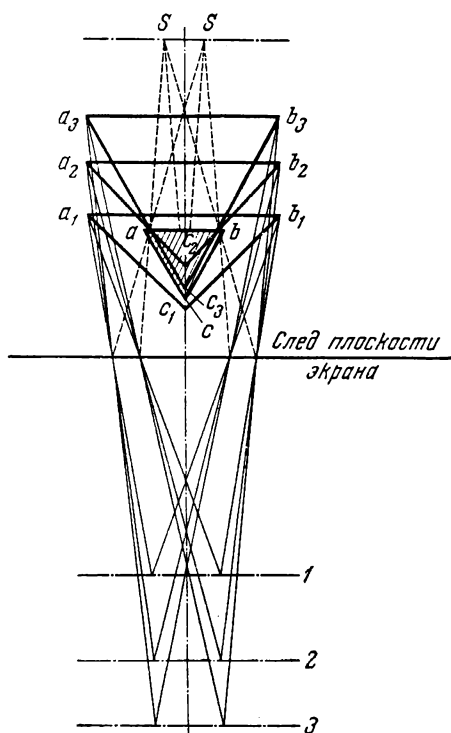


Рис. 242. Схема изменения деформаций при удалении наблюдателя от экрана

¹ В отличие от величины $2a$ (межзрачкового расстояния) мы обозначили здесь полуоси через α и β .

§ 6. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ОШИБОК ПРИ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Иллюзия кажущегося рельефа, как мы заметили, может возникать в результате самых различных причин, определяемых в основном тем, что работу нашего зрительного аппарата дополняет психофизиологический процесс. Однако, как известно, ошибки в определении рельефа и глубины пространства при рассматривании стереоскопических изображений могут возникать вследствие недостатков, присущих самим изображениям стереограммы.

Здесь мы рассмотрим некоторые недостатки стереограммы, которые могут создавать кажущуюся иллюзию рельефа, не соответствующую действительности. Прежде всего нужно отметить, что неестественное восприятие глубины пространства на стереоскопическом изображении может зависеть от того, что изображение стереограммы фотографируется со стереоскопическим базисом, не соответствующим нормальному базису. Так, в случае увеличенного базиса при фотографировании возникает эффект гиперстереоскопии, при котором наблюдаемая картина представляется с более детализированным рельефом, но с сокращенной протяженностью в глубину. В случае уменьшенного базиса при съемках рассматривание стереограммы может создать впечатление менее подробного рельефа, но более вытянутой в глубину картины, чем в действительности.

В качестве примера таких стереоскопических изображений, снятых с увеличенным или с уменьшенным базисом против нормального, служат стереограммы, воспроизведенные на листе VI. На этом листе верхняя стереограмма снята со стереоскопическим базисом, вдвое меньшим нормального. Средние стереограммы исполнены с нормальным базисом, а нижняя — с базисом, вдвое большим нормального.

Как уже отмечалось ранее, для воспроизведения естественного рельефа на стереоскопическом изображении при съемке частичных изображений стереограммы и при их воспроизведении должны соблюдаться условия ортостереоскопии, которыми определяется зависимость между стереобазисом, допустимым при съемке, и угловыми увеличениями воспроизводимого стереоскопического изображения. Только при соблюдении этих условий может быть получена естественная глубина пространства на воспроизводимом стереоскопическом изображении.

Здесь можно еще заметить, что неестественное воспроизведение рельефа стереоскопического изображения может произойти случайно от ошибки в определении правого и левого частичных изображений стереограммы. Если эти изображения будут перепутаны, то при наблюдении правым глазом левого частичного изображения стереограммы, а левым глазом — правого возникает псевдоскопический эффект, при котором рельеф воспроизводимого предмета получается обратным, т. е. выпуклые части предмета оказываются вогнутыми и наоборот.

Этот эффект не всегда отчетливо заметен, и при наблюдении псевдоскопических изображений хорошо знакомых нам предметов, например человеческого лица, окружающей нас обстановки и т. д., мы вследствие психологической особенности нашего восприятия не замечаем обратного рельефа, но происходящая в этом случае борьба между нашим сознанием и псевдоскопическим эффектом приводит к значительному зрительному утомлению. В случае же наблюдения рельефа незнакомых нам предметов псевдоскопический эффект чувствуется в полной мере, и мы воспринимаем изображения таких предметов с обратным рельефом.

Значительные ошибки воспроизводимого пространства на стереоскопическом изображении могут происходить вследствие того, что изображения стереограммы фотографируются одновременно. Случаи одновременного фотографирования частичных изображений стереограммы

существенны при съемке движущихся объектов или в том случае, если фотографирование объекта производится движущимся аппаратом (например, при аэросъемке).

Мы уже разбирали один случай ошибок в определении удаленности движущихся объектов на стереоскопическом фильме, возникающих при кинематографической съемке правого и левого изображений стереограммы в чередующемся порядке на различные кадры фильма и при последующей одновременной проекции этих изображений. Можно указать, что такого же рода неправильные впечатления об удаленности движущихся объектов возникают и при фотографическом воспроизведении частичных изображений стереограммы, снятых неодновременно. Так, если стереоскопическая аэросъемка выполняется путем последовательного фотографирования изображений с летящего самолета, то каждое из изображений оказывается снятым со своей точки зрения через некоторый промежуток времени после предыдущего. То расстояние, которое пролетает за этот промежуток времени самолет, составляет стереобазис между точками съемки этих двух частичных изображений.

Пара последовательно снятых при аэросъемке частичных изображений может составить нормальную стереограмму. При правильном рассматривании этой пары изображений легко обнаружить естественный рельеф сфотографированной местности. Однако если во время фотографирования на поверхности двигались какие-либо объекты, например поезд, автомобиль или конница и т. п., то на последовательно произведенных снимках они окажутся зафиксированными на разных участках местности. Такой сдвиг объектов на двух изображениях, составляющих стереограмму, равносителен пространственному параллаксу между этими изображениями, который создает на стереокартине иллюзию удаленности объектов от поверхности земли. В случае движения объектов в одну сторону возникает отрицательный параллакс, который создает иллюзию как бы углубленности этих объектов под поверхность земли. В случае положительного параллакса создается впечатление объектов, висящих в воздухе над земной поверхностью. При рассматривании стереоскопических аэрофотоснимков, на которых были сняты движущиеся объекты, последние кажутся как бы отделенными от поверхности земли. Рельеф, наблюдаемый на стереограмме, составленной из аэроснимков, в значительной мере зависит от того, как ориентированы эти снимки относительно направления полета.

Так, если оба стереоскопических снимка вращать вокруг осей, то, когда направление полета самолета было справа налево и правый снимок делался первым, а левый вторым — при таком расположении снимков в стереограмме глубина наблюдаемого рельефа стереоскопической картины будет наибольшей. При повороте каждого из снимков по часовой стрелке глубина наблюдаемого рельефа на стереоскопическом изображении уменьшается. Если угол поворота составит 90° , то рельеф местности перестает быть заметным. При дальнейшем повороте снимков появляется обратный псевдоскопический рельеф, который достигает своего максимума при повороте снимков на 180° .

При дальнейшем повороте псевдоскопический эффект постепенно уменьшается, становится незаметным при повороте на 270° , и при последующем повороте начинает обнаруживаться снова правильный рельеф, который достигает своего максимума при вращении снимков в исходное положение.

В заключение можно остановиться еще на одном виде искажений, видимых в стереоскопической картине, — это искажения, зависящие от местоположения наблюдателя по отношению к воспроизводимым стереоскопическим изображениям. Они наиболее заметны при наблюдении спроецированного на экран стереоскопического изображения. В зависимости от местонахождения по отношению к экрану, на который проецируется стереоскопическое изображение, зрителю представляется различной глу-

бина воспроизводимого стереоскопического пространства. Если зритель находится близко от экрана, то стереоскопическая картина кажется ему более плоской, чем тому зрителю, который более удален от него (рис. 238). На этом же рисунке показано, что зритель, сидящий на боковых местах, видит пространственное изображение при стереоскопической проекции как бы повернутым к нему. Таким образом, можно заметить, что наблюдающий стереоскопическое изображение на экране при перемещении своего местоположения будет воспринимать пространственную картину, отличную от той, которую он воспринимал первоначально. Это значит, что в стереокинотеатре зрители видят пространственную картину воспроизводимого стереоскопического изображения, несколько отличную от той, какую видят другие зрители.

Очевидно, что для правильного воспроизведения стереоскопического изображения необходимо всегда учитывать возможные искажения и ошибки в воспроизводимом пространственном изображении, зависящие от точки наблюдения этих изображений. С другой стороны, надо иметь в виду, что перспективно искаженные рисунки при стереоскопическом воспроизведении могут дать совершенно естественную пространственную картину, как это можно наблюдать при рассматривании стереограмм, представленных на листе XXXVI.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

Стереоскопия — одно из удивительных свойств зрительного аппарата демонстрирует нам кибернетический механизм нашего мозга и его работу по автоматическому синтезированию пространственного трехмерного образа, создаваемого по двум перспективным картинам, представляющим двумерные отображения объекта.

Достаточно еще раз взглянуть через цветные очки на анаглифические рисунки, приведенные на вклейках, чтобы проследить за автоматичностью возникновения пространственного образа в нашем сознании помимо нашей воли без какого-либо усилия с нашей стороны.

Особенно нагляден процесс возникновения пространственного образа на рисунках, представляющих сложные переплетения объемных конфигураций, зрительно незнакомых. Только всматриваясь в такие рисунки, мы постепенно начинаем различать рельеф и пространственную структуру изображенных на них объектов. Смотря через цветные очки, например, на цветы, изображенные на внутренней стороне обложки, или на кукурузное поле, изображенное на листе I, мы видим, как постепенно разделяются в пространстве отдельные веточки и листочки изображенных растений. Всматриваясь в стереоскопическую картину, постепенно через 5, 10, 15 секунд, мы начинаем различать все более и более подробное пространственное расположение и рельеф изображенных деталей. Для переработки получаемой зрительной информации о пространственном расположении объектов, нашему мозгу требуется известное время. Чем сложнее пространственная структура объекта и чем менее известен он из предыдущего опыта, тем большая работа предельно выполняется мозгом для его пространственной расшифровки.

Анализ кибернетического действия нашего мозга, в известной степени, можно проследить по переработке им зрительной информации. Весьма вероятно, что изучение особенностей синтеза пространственного образа позволит более глубоко проследить и понять этот процесс.

Автоматичность слияния двух сопряженных изображений, видимых правым и левым глазом, позволяет наблюдать и изучать много интереснейших явлений психо-физиологического характера. Особенно интересно проявляется здесь эффект отделения полезной информации от различного

рода помех. Так, например, рассматривая пространственную структуру объектов на анаглифических рисунках, мы автоматически исключаем из сознания дефекты изображения, происходящие из-за недостаточной чистоты сепарации правого и левого изображения. Наглядный пример такого выделения полезной информации можно наблюдать на анаглифических рисунках, приведенных на листах X и XXVIII. Интересно, что для того, чтобы исключить помехи из-за неполноты сепарации изображений, эти рисунки следует рассматривать с большого удаления (около 2 м), т. е. при уменьшенном параллаксе.

Постепенное формирование пространственного образа за счет стереоэффекта можно наблюдать и на черно-белых стереограммах, помещенных на вклеенных в книгу листах.

Стереоскопический эффект нашего зрительного аппарата в своей сущности еще мало изучен. Это происходит потому, что сейчас мы еще находимся в начальной стадии познания работы нашего мозга и не знаем, как перерабатывается им зрительная информация. Однако, закономерности проявления стереоскопического эффекта изучены хорошо.

Стереоскопический эффект нашего зрения используется для решения многих технических задач. Целые области техники опираются в своей основе на использование стереоэффекта. К таким областям техники относятся стереофотограмметрия, стереокино, стереотелевидение и др. В книге об утилитарном использовании стереоскопии мы писали достаточно подробно. Эти области техники прогрессируют и совершенствуются. Большие успехи в последнее время достигнуты по практическому осуществлению многостереопарной и интегральной фотографии. С. П. Ивановым разработан процесс 19-ти стереопарной интегральной фотографии с проекцией изображений на большой линзово-растровый экран (размером $1,2 \times 1,2$ м). Этим открывается практически реальная возможность осуществления высококачественной стереокинопроекции. Стереоскопический метод исследований все шире входит в практику научных исследований в области атомной физики и, особенно, при исследовании быстро протекающих явлений. Сейчас строятся высокоскоростные камеры для стереоскопической киносъемки. Для прослеживания пространственных треков элементарных частиц строятся стереоскопические пузырьковые камеры и камеры Вильсона.

Стереоскопические методы исследований проникают все шире и в медицину, и в биологическую науку. Разрабатываются специальные стереоскопические приборы для антропологических исследований, совершенствуются методы проведения операций мозга под стереоскопическим контролем и многое др.

В заключение хочется отметить, что хотя процессы, происходящие в мозгу при переработки зрительной информации, еще недостаточно ясно, но уже делаются довольно удачные попытки имитировать деятельность мозга в этом отношении.

Стереоскопический эффект может распознавать не только человек, но и машина. Уже предложены удачные принципы для автоматической машинной обработки стереопар аэрофотоснимков.

Можно надеяться, что в недалеком будущем будет разгадана физическая сущность процесса переработки мозгом поступающей в него информации и что такие функциональные особенности мозга, как пространственное опознавание объекта на базе стереоскопического эффекта, явятся не только привилегией биологических организмов, но и смогут осуществляться на искусственных кибернетических машинах, анализирующих зрительную информацию.



ЛИТЕРАТУРА¹

- А р ь я к с Г. Я. Чудеса стереоскопии. М., Изд-во «Московский рабочий», 1928.
- Б а р а н о в с к и й В. В. К вопросу об оценке абсолютной удаленности предметов. Проблемы физиологической оптики, т. II, 56, 1955.
- Б а р б а н е л ь С. Р. К вопросу о характеристиках зон стереоскопического видения при сепарации стереоскопических изображений радиальными растрами. Канд. дисс. Л., 1948.
- Б а с о в М. М. Стереоскопическая кинопроекция по поляризационному методу. Киномеханик, № 8, 1940.
- Б е л о с т о ц к и й Е. М., Г о л ь ц м а н Н. И. и С е м е н о в с к а я Е. Н. О восприятии пространства в стереокино. Проблемы физиологической оптики, т. 12, 255—265, 1958.
- Б е л я е в Н. Стереокино и его изобретатель (С. П. Иванов). Искусство кино, № 1, 1941.
- Б е л и к Г. и Г о л ь д и н З. Современное состояние объемной кинопроекции. Кинофотохимпромышленность, № 12, 1938.
- Б и н к Р. Б р ю к к е р Р., М о з г и г л а з. Л., Медгиз, 1959.
- Б о л т я н с к и й А. Г. Исследования искажений передачи пространственной модели в стереокино. Канд. дисс., М., 1956.
- Б о л т я н с к и й А. Г., Б е р н ш т е й н Н. Д. Оптическое устройство для съемки и проекции стереоизображений. Авт. свид. № 92980, октябрь, 1950.
- Б у р г о в В. А. О восприятии объемности и удаленности предметов в специально стереоскопических кинофильмах. Техника кино и телевидения, № 4, 1959.
- В а в и л о в С. И. Глаз и солнце. Изд-во АН СССР, 1952.
- В а л ю с Н. А. Объемное (стереоскопическое) кино. Киномеханик, № 4, 1937.
- В а л ю с Н. А. Обзор основных способов воспроизведения пространственных изображений. Кинофототехника, № 2, 1941.
- В а л ю с Н. А. Основы стереоскопической кинематографии. М., Госкиноиздат, 1941.
- В а л ю с Н. А. Метод изготовления линзово-растровой пленки. Труды НИКФИ, вып. 7. Сообщ. 69, 1944.
- В а л ю с Н. А. Как видит глаз. М., Гостехиздат, 1948.
- В а л ю с Н. А. Современное состояние техники стереоскопической кинематографии. Труды НИКФИ, вып. IX. Сообщ. 102, 1948.
- В а л ю с Н. А. и О к у н е в Л. Я. Введение в теорию искажений стереоскопического пространства при стереопроекции на плоский экран. Труды НИКФИ, вып. IX. Сообщ. 103, 1948.
- В а л ю с Н. А. О вторичных зонах сепарации лучей у радиально-растрового стереоэкрана. Труды НИКФИ, вып. IX. Сообщ. 105, 1948.
- В а л ю с Н. А., А в и л о в Г. В. и Б е л о в о л Е. Г. Оптическая печать стереоскопических фотоизображений на линзово-растровой пленке. Труды НИКФИ, вып. IX. Сообщ. 112, 1948.
- В а л ю с Н. А., А в и л о в Г. В. и К р у п е н и н Л. К. Опыт получения цветных стереоскопических фотоизображений на линзово-растровой пленке. Труды НИКФИ, вып. IX. Сообщ. 113, 1948.

¹ В основном указаны источники, использованные автором, и отмечены наиболее важные работы по различным разделам стереоскопии.

- В а л ю с Н. А. Поляризационно-растровая система стереоскопической кинопроекции. Труды НИКФИ, вып. IX. Сообщ. 114, 1948.
- В а л ю с Н. А. Аппаратура для съемки стереофильма на две пленки. Труды НИКФИ, вып. IX. Сообщ. 115, 1948.
- В а л ю с Н. А. Об опытной демонстрации стереоскопических фильмов спаренной кинопроекционной аппаратурой. Труды НИКФИ, вып. IX. Сообщ. 116, 1948.
- В а л ю с Н. А. Оптическая приставка к киносъёмочному аппарату для съемки пластического фильма. Авт. свид. № 59680, июнь, 1939.
- В а л ю с Н. А. Телескопическая растровая система. Авт. свид. № 67842, ноябрь, 1944.
- В а л ю с Н. А., К и т а й г о р о д с к и й И. И. и К р и в и ц к а я М. Я. Фотографический способ изготовления линзового раstra на стекле. Авт. свид. № 72824, май, 1947.
- В а л ю с Н. А. и Г о л ь ц м а н Н. И. Визир для ориентировки зрителей в стереокинотеатре. Авт. свид. № 77719, февраль, 1949 (первый вариант); авт. свид. № 86267, октябрь, 1949 (второй вариант).
- В а л ю с Н. А., К и т а й г о р о д с к и й И. И. и К р и в и ц к а я М. Я. Экран для стереоскопической проекции. Авт. свид. № 81633, май, 1947.
- В а л ю с Н. А. Растровая оптика. М.—Л., ГТТИ, 1949.
- В а с ь к и н Г. И. Светотехнические исследования радиально-растрового стереоэкрана. Кинофотохимпромышленность, № 8, 1938.
- В и н о г р а д о в Д. Р. Стереоскопическое зрение и методика его исследования. Канд. дисс. Харьков, 1952.
- да В и н ч и Л е о н а р д о. Трактат о живописи. Избранные произведения, т. II, М.—Л., «Академия», 1935.
- В л а д и м и р с к и й Г. А. Построение стереоскопических проекций геометрических фигур. Математика в школе, № 3, 1937.
- В л а д и м и р с к и й Г. А. Альбом стереоскопических чертежей-анаглифов к курсу стереометрии. М., Учпедгиз, 1939.
- В л а д и м и р с к и й Г. А. Альбом стереоскопических фигур к задачку Рыбкина, изд. 2-е, М., Учпедгиз, 1940.
- Г а с с о в с к и й Л. Н. и С а м с о н о в а В. Г. Глаз и пути повышения эффективности его работы. Изд-во ВООМП, 1934.
- Г е р и н г Э. Пространственное чувство и движение глаза. В «Руководстве к физиологии» Л. Германа, т. 3, СПб., 1887.
- Г о л д о в с к и й Е. М. Панорамный кинематограф. М., «Искусство», 1959.
- Г у р е в и ч С. С. Стереоскопическая печать. М., Гизлегпром, 1933.
- Г у р е в и ч С. С. Объемная печатная иллюстрация. М., «Искусство», 1959.
- Д о н д е А. М. Стереоскопическая фотография, ее теория и практика, М., 1908.
- Д р о б ы ш е в Ф. В. Теория стереометрических приборов. Труды ЦНИИГАиК, вып. 32, 1940.
- Д р о б ы ш е в Ф. В. Фотограмметрические приборы и инструменты. М., Геодезиздат, 1951.
- Д у х о т а Т. Г. Стереоскоп. Київ, К. Дерт. вод. тех. літ. УРСР. Зрительные ощущения и восприятия. Сб. СОЦЭКГИЗ. М., 1935.
- И в а н о в Б. Т. Стереоскоп. Техника молодежи, № 7, 1940.
- И в а н о в Б. Т. Растровый экран системы С. П. Иванова, Кинофототехника, № 4, 1941.
- И в а н о в Б. Т. Растровая стереоскопия в кино. М., Госкиноиздат, 1946.
- И в а н о в Б. Т. Стереоскопическое кино. М., Госкиноиздат, 1951.
- И в а н о в Б. Т. Стереоскопическая техника. М., «Искусство», 1956.
- И в а н о в Б. Т. и Б а р ц е в с к и й Б. У. Объемные познания. Научн. популяр. б-ка, вып. 93. М., Гос. изд-во техн. теорет. лит., 1957.
- И в а н о в С. и Б е л я е в Н. Стереоскопическое кино. Киномеханик, № 1, 1940.
- И в а н о в С. Стереоскопическое кино. Советская наука, № 9, 1940.
- И в а н о в С. П. Основные принципы и перспективы техники стереоскоп. Труды НИКФИ, вып. 7. Сообщ. 91, 1947.
- И в а н о в С. П. О стереоскопическом кино. Стенограмма публичной лекции. Изд-во «Правда», 1948.
- И в а н о в С. П. О цветной стереоскопической фотографии. Изд-во «Правда», 1951.

- Иванов С. П. Светосильный линзово-растровый стереозкран. Авт. свид. № 57019, октябрь, 1935.
- Иванов С. П. и Андриевский А. Н. Изготовление интегрального экрана для стереопроекции. Авт. свид. по заявке ГУК-976, июль, 1943.
- Ивановская И. Л., Новиков А. Г. Большая прямоугольная камера Вильсона (с описанием схемы стереофотографирования). ЖТФ, т. XXVI, вып. 1, 1956.
- Кауфман А. К. Исследования в области рельефного кино. Кинофотохимпромышленность, № 8, 1937.
- Клементьев А. К. Стереоскопия в архитектуре и строительстве. М., Госстройиздат, 1952.
- Козырь И. В. Стереоальбом к курсу зоологии. М., Учпедгиз, 1939.
- Коллин Л. С. Использование бинокулярного смещения цветов в телевидении. В сб.: «Цветное телевидение». М., Связьиздат, 1957.
- Коншин М. Д. Аэрофототопография, 3-е изд., М., Геодезиздат, 1954.
- Коробко Б. Г. Глубинное зрение. Симферополь, 1946.
- Костинский С. К. О стереоскопическом методе исследования небесных фотографий и его применении к определению собственного движения. Изв. АН СССР, № 17, стр. 1259, 1908.
- Кравков С. В. Глаз и его работа. М., Изд-во АН СССР, 1950.
- Левингтон А. Л. Опыт стереоскопической проекции по анаглифическому методу. Кинофотохимпромышленность, № 8, 1937.
- Лекиш М. Свет и работа. ОНТИ — ГТТИ, 1934.
- Луизов А. В. Объемное кино. Физика в школе, № 2, 1948.
- Маизель С. О. Свет и зрение. М., Воспиздат, 1949.
- Нюберг Н. Д. Теоретические основы цветной репродукции. М., Изд-во Советская наука, 1947.
- Оптика в военном деле. Сб. под ред. С. И. Вавилова и М. В. Савостьяновой, изд. 3-е. М.—Л., Изд-во АН СССР.
- Орлов С. В. Теория и практика стереоскопического фотографирования. М., 1930—1934.
- Орлов П. М. Наземная стереофотограмметрия. М., Моск. гидромеллиоративный ин-т, 1938.
- Павлов И. П. Лекции о работе больших полушарий головного мозга. Полн. собр. соч., т. IV. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947.
- Пал И. Начертательная геометрия с анаглифическими иллюстрациями. Издательство технической литературы. Будапешт, 1961.
- Пель В. Г. и Демчев В. И. Светотехнические испытания линзово-растровых стереозкранов. Труды НИКФИ, вып. IX. Сообщ. 109, 1948.
- Писаржевский О. Третье измерение. Техника — молодежи, № 1, 1944.
- Проворнов С. М. и Голод И. С. Современное состояние техники стереоскопической кинематографии. В сб. «Цветное и стереоскопическое кино». М.—Л., 1947.
- Романовский Г. В. Руководство по стереообработке аэроснимков при картографировании в масштабе 1 : 100 000. М., Изд-во геодезич. и картографич. лит., 1941.
- Романовский Г. В. Способ неискаженной модели. М., Воспиздат, 1948.
- Рынин Н. Киноперспектива. М., 1936.
- Скиридов А. С. Стереофотограмметрия. М., Геодезиздат, 1951.
- Слюсарев Г. Г. Геометрическая оптика. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1946.
- Соколов П. П. Автостереоскопия и интегральная фотография по проф. Липпману. Изд-во МГУ, 1911.
- Спирidonов И. Н. и Грибоедов А. С. Автомобили «ГАЗ» и «ЗИС». Стереоскопический альбом. М.—Л., Изогиз, 1935.
- Справочная книга оптика-механика, т. I, II, М.—Л., ОНТИ — ГТТИ, 1936.
- Тудоровский А. И. Теория оптических приборов. Изд-во АН СССР, ч. 1, 1948; ч. 2, 1952.
- Умов Н. А. Стереоскопический дальномер, физическое обозрение, т. 4, 1903.
- Урмахер Л. С. Стереофотограмметрический способ подбора контактных очковых линз. Медицинская промышленность СССР, № 11, 1957.
- Фефилов Б. В. Прикладная оптика. М., Геодезиздат, 1947.

- Флинт Е. Е. и Анваер А. Д. Стереоальбомы по кристаллографии. М., Учпедгиз, ч. 1, 1939, ч. 2, 1940.
- Фурдусев В. В. Кино завтра. Гл. 3. Пути стереокинематографии. М., «Московский рабочий», 1929.
- Цивкин М. В. Исследование радиальных растров из конических линз применительно к стереоскопической проекции. Канд. дисс. ЛИКИ, 1950.
- Челпанов Г. М. Проблема восприятия пространства, ч. 1. Киев, 1896.
- Чибисов К. В. Теория фотографических процессов, т. 1. Кинофотоиздат, 1939.
- Чураев Л. П. и Фаерман Г. П. Оптические свойства поляризационных фильтров. ЖТФ, вып. 4—5, 1944.
- Шеплюк В. Стереоскопический. М., Госкиноиздат, 1945.
- Шестаков М. А. Альбом стереоизображений по начертательной геометрии. М., Стройиздат, 1935.
- Шмаков П. В. Основы цветного и объемного телевидения. М., Изд-во «Советское радио», 1954.
- Шмаков П. В. Цветное и объемное телевидение. М., Связьиздат, 1935.
- Шубников А. В. Новое в растровой оптике. Природа, № 6, 1953.
- Эйзенштейн С. М. О стереокино. Искусство кино, № 2, 1948.
- Юренев Г. Первый стереоскопический. Кино, № 3, 1941.
- Ярбус А. Л. и Гольцман Н. И. Движения глаз при восприятии изображений в стереокино. Труды Ин-та биологической физики, т. 1, 1955.
- Albada L. E. Physiologische Erscheinungen beim Betrachten von Raumbildern, Raumbild, Heft 4, 1937.
- Brewster, Sur David F. R. S. The Stereoscope, Its History, Theory and Construction. L., 1856.
- Blank Albert A. Axiomatics of binocular vision. The foundations of metric geometry in relation to space perception. J. Opt. Soc. America, 48, N 5, 1958.
- Cornwell-Clyne A. 3-D Kinematography and new screen techniques. L., 1954.
- Emigh C. R. Stereoscopic reprojection and radius of curvature measurements of cloudchamber tracks, Rev. Scient. Instrum., 25, N 6, 1954.
- Gowland P. The art and technique of stereophotography, N. Y., Crown, 1954.
- Le Grand Ives. La vision binoculaire et le sens du relief, Opticien belge, N 56, 1958.
- Helmcke J. G., Orthmann H. I. Theorie und Praxis der elektronenmikroskopischen Stereoaufnahmen. Optic, 11, N 12, 1954.
- Judge A. W. Stereoscopic Photography. Its Application to Science, Industry and Education 3rd rev. ed., Chapman & Hall, Ltd. L., 1950.
- Kurz Henry. Ortostereoscapy. J. Opt. Soc. America, XXVII, N 10, oct. 1937.
- Kuchinka Eduard. Die Photoplastik. Herstellung photographischer Skulpturen und Reliefs und ähnliche Verfahren, Hall (Saale). Knapp — Verlag, 1926.
- Krimsky Emanuel. The manegement of binocular imbalance. Philadelphia, 1948.
- Land Edwin. H. Vectographs images in terms of vectorial inequality and their application in three-dimensional representation, J. Opt. Soc. America, 30, June 1940.
- Motokawa K., Nakagawa D., Kohata T. Monocular Stereoscopic vision and gradients of retinal induction. J. Compar and Physiol. Psychol., 49, N 4, 1956.
- Noaillon E. Cinema en relief sans lunette, Rev. Universelle de Mines, Dec. 1936.
- Norling J. A. The Stereoscopic Art — A Reprin, Journal of the SMPTE, vol. 60, March 1953.
- Ogle Kenneth N. Researches in binocular vision. Philadelphia — London, 1950.
- Rösch Jean. Mesures stéréoscopiques appliquées à l'astronomie et recherches connexes d'optique physiologique. Paris, 1943.
- Reiner Josef. Farben-stercoskopie, Süddeutsche Optikerzeitung, 10, N 7, 1955.
- Rzymkowski Johannes. Stereophotographie and Stereophotogrametrie reproduction of the cornea and sclera of the living eye, Amer. J. Optom. and Arch. Amer. Acad. Optom., 31, N 8, 1954.

- S n o w William B. Basic principles of stereophonie sound, JRE Trans, Audio, Au-3, N 2, 2955.
- S p o t t i s w o o d e Raymond and S p o t t i s w o o d e Nigel. The Theory of Stereoscopic Transmission to the motion picture, University of California Press, Berkeley. Calif., 1953.
- S y m o n s Konneth, H a n d e Michael. Stereophotography. London, N. Y., 1957.
-

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Зрительное восприятие пространства и стереоэффект	7
§ 1. Определение трехмерности реального пространства	7
§ 2. Условия возникновения пространственного представления	13
§ 3. Некоторые особенности зрительного аппарата	17
§ 4. Бинокулярное зрение и стереоскопический эффект	29
§ 5. Особенности стереоскопического восприятия пространства	36
§ 6. Особенности бинокулярного восприятия цвета	43
§ 7. Дополнительные факторы, обуславливающие пластичность зрительного образа	44
§ 8. Пластика движения и динамический стереоэффект	53
§ 9. Ошибки стереоскопического зрения и некоторые стереоскопические иллюзии	55
Глава II. Оптические принципы воспроизведения пространственных изображений	60
§ 1. Классификация основных способов воспроизведения пространственных изображений	60
§ 2. Воспроизведение пластических изображений	65
§ 3. Оптическая репродукция пространственных изображений	72
§ 4. Воспроизведение интегральных пространственных изображений	75
§ 5. Стереоскопическая репродукция пространственных изображений	81
§ 6. Общие принципы рассматривания стереоскопических пар изображений	83
§ 7. Стереоскопы	86
§ 8. Эклипсная система сепарации стереоскопических изображений	89
§ 9. Цветные анаглифы	92
§ 10. Поляризационные системы сепарации стереоскопических изображений	96
Глава III. Растровая сепарация стереоскопических изображений	101
§ 1. Растровая автостереоскопия	101
§ 2. Основные свойства регулярно-растровых оптических систем	103
§ 3. Радиально-растровый стереоэкран	111
§ 4. Стереоэкран с многоплоскостным растром	117
§ 5. Ограничения светосилы и сепарирующих свойств растровых стереоэкранов	121
§ 6. Светосильные линзово-растровые стереоэкраны	128
§ 7. Растровые диаскопические стереоэкраны	132
§ 8. Поляризационно-растровый стереоэкран	134
§ 9. Интегральные экраны С. П. Иванова и А. Н. Андриевского	137
§ 10. Оптические системы с многозрачковыми выходами для безочкового наблюдения стереоизображений	141
§ 11. Многостереопарное воспроизведение пространственных изображений	143

§ 12. Проекционное воспроизведение интегральных изображений . . .	147
Глава IV. Стереоскопическая фотография и стереоскопическая печать . . .	152
§ 1. Общие принципы получения стереоскопических фотографий . .	152
§ 2. Стереоскопическая съемка однообъективными фотокамерами со стереонасадками	156
§ 3. Двухобъективные стереофотоаппараты	159
§ 4. Фотографическая печать стереоскопических снимков	163
§ 5. Полиграфическая печать стереоскопических изображений . .	166
§ 6. Изготовление стереоскопических отпечатков в виде вектографов	170
§ 7. Изготовление автостереоскопических фотографий на линзово- растровой пленке	173
§ 8. Получение панорамно-стереоскопических фотографий на лин- зово-растровой пленке	180
§ 9. Изготовление цветных стереоскопических фотографий	182
Глава V. Стереоскопическая кинематография и телевидение	186
§ 1. Развитие техники стереоскопической кинематографии	186
§ 2. Съемка стереоскопических кинофильмов	188
§ 3. Проекция стереоскопических кинофильмов	194
§ 4. Безочковая стереоскопическая кинопроекция по системе С. П. Иванова	197
§ 5. Дальнейшее усовершенствование техники стереоскопической кинематографии	202
§ 6. Стереоскопическое воспроизведение изображений в широкоэк- ранном и панорамном кино	207
§ 7. Стереоскопическое звуковоспроизведение	212
§ 8. Принципы осуществления стереоскопического телевидения	218
§ 9. Системы цветного стереоскопического телевидения	227
Глава VI. Применение стереоскопического наблюдения в научных исследо- ваниях и учебных целях	236
§ 1. Стереоскопический метод исследования	236
§ 2. Применение стереоскопических зрительных приборов для на- блюдения удаленных объектов	239
§ 3. Применение стереоскопических исследований в астрономии	245
§ 4. Использование стереокомпаратора для обмера стереограмм	246
§ 5. Применение стереоскопических приборов для рассматривания мелких и микроскопических объектов	249
§ 6. Применение стереоскопических методов в биологии и медицине . .	255
§ 7. Стереоскопические рентгеноисследования	256
§ 8. Стереоскопический метод идентификации объектов	260
Глава VII. Применение стереоскопии в технике для пространственных измерений и картографирования	262
§ 1. Стереоскопические методы измерения расстояний	262
§ 2. Основные типы стереодальномеров	265
§ 3. Стереодальномеры высокой точности	271
§ 4. Стереоскопическая аэрофотосъемка	275
§ 5. Методы стереофотограмметрии	277
§ 6. Приборы для стереофотограмметрических измерений	281
§ 7. Инженерная стереофотограмметрическая съемка	290
§ 8. Простейшие методы стереоскопических измерений	295
§ 9. Особенности зрительной дешифровки стереоскопической кар- тины	300
Глава VIII. Стереоскопия в изобразительном искусстве	304
§ 1. Применение стереоскопии в изобразительном искусстве	304
§ 2. Принципы изготовления фотоскульптуры и фоторельефа	306
§ 3. Рисование стереоскопических изображений	309
§ 4. Графическое построение стереограмм	311
§ 5. Механическое рисование стереограмм	316
§ 6. Стереоскопическая живопись	318
§ 7. Искусственные стереоскопические иллюзии	320
§ 8. Стереоскопическое воспроизведение скульптурных изображений	322
Глава IX. Метрика стереоскопического пространства	326
§ 1. Единицы измерения стереоскопического эффекта	326
§ 2. Особенности воспроизведения пространственных соотношений в стереоскопическом изображении	332

§ 3. Условия ортоморфического воспроизведения стереоскопического пространства	338
§ 4. Теория деформации пространства изображений при стереопроекции на плоский экран	346
§ 5. Определение деформации стереоскопического изображения на плоскости	352
§ 6. Происхождение возможных ошибок при стереоскопических измерениях	365
Послесловие	368
Л и т е р а т у р а	371



Николай Адамович Валюс

Стереоскопия

*Утверждено к печати
Отделением химических наук
Академии наук СССР*

*

Редактор Издательства *Г. Г. Гуськов*
Художник *А. Я. Михайлов*
Технический редактор *Е. В. Макуни*
Корректор *Э. А. Розыбакиева*

*

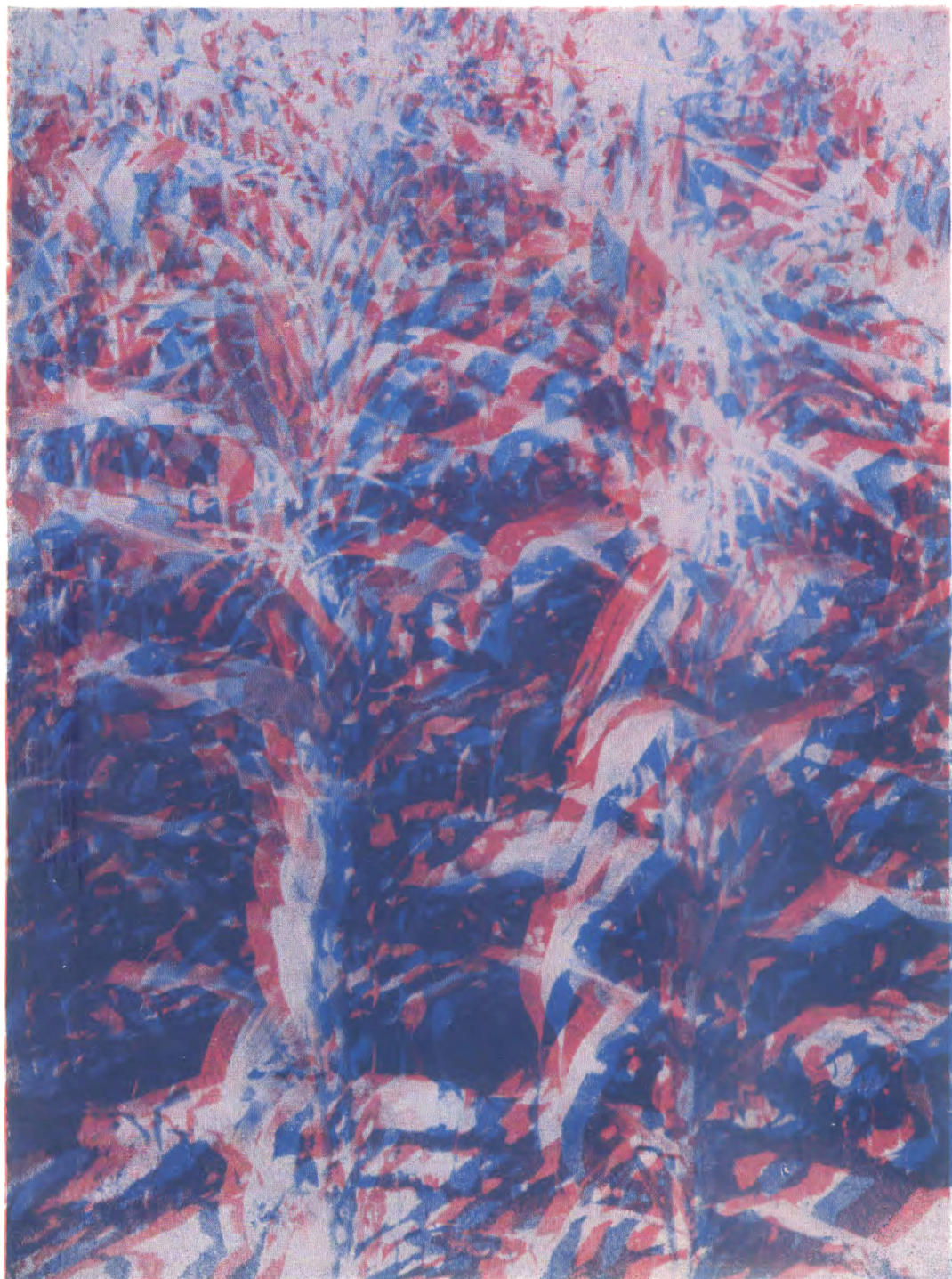
РИСО АН СССР № 1-22В. Сдано в набор 25/I 1962 г.
Подписано к печати 19/VII 1962 г. Формат 70×108¹/₁₆.
Печ. л. 23,75+21 вкл. Усл. печ. л. 31,53. Уч.- издат. л. 34.4.
Тираж 5000 экз. Т-09302. Изд. № 4785. Тип. зак. № 234.

Цена 2 руб.

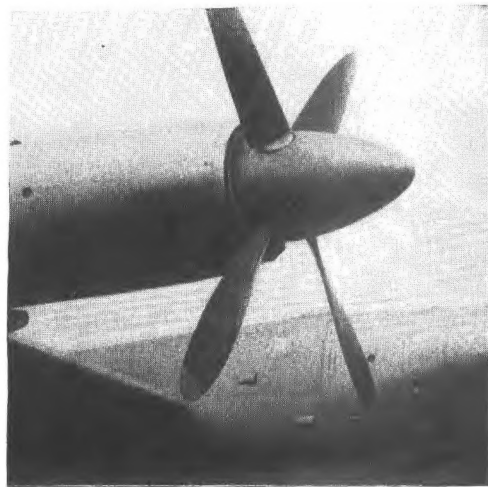
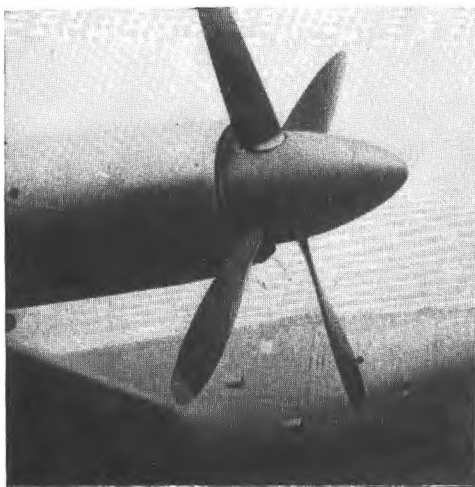
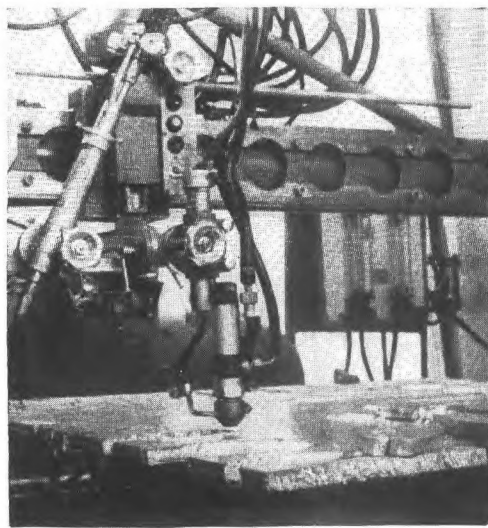
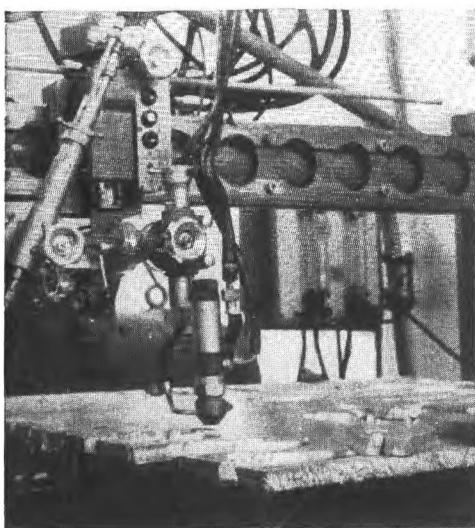
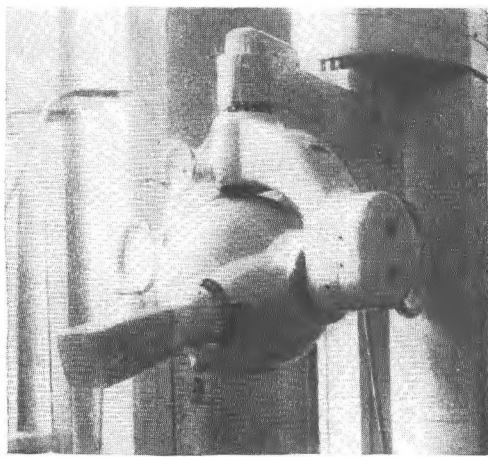
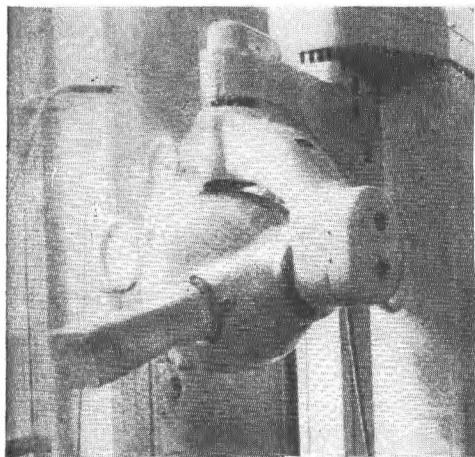
Издательство Академии наук СССР.
Москва, Б-62, Подсосенский пер., 21
2-я типография Издательства АН СССР
Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

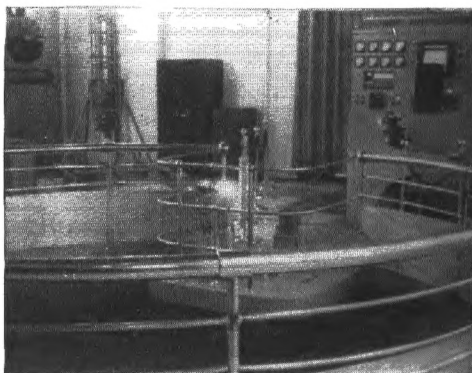
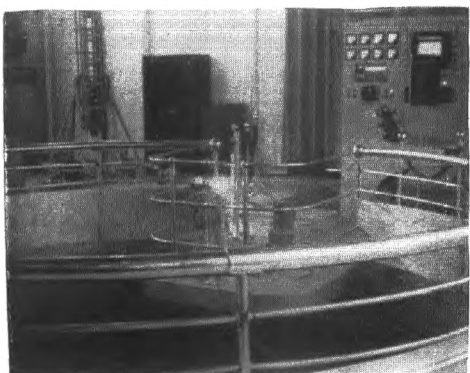
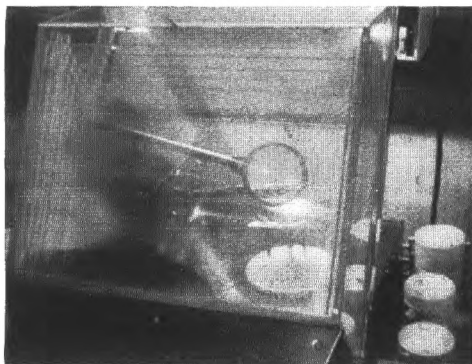
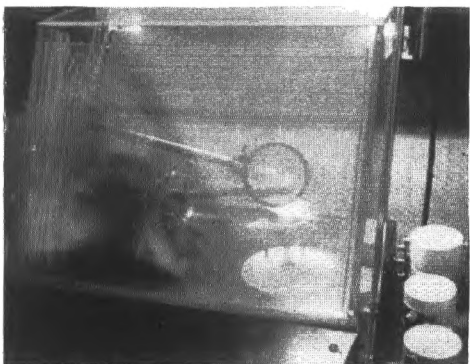
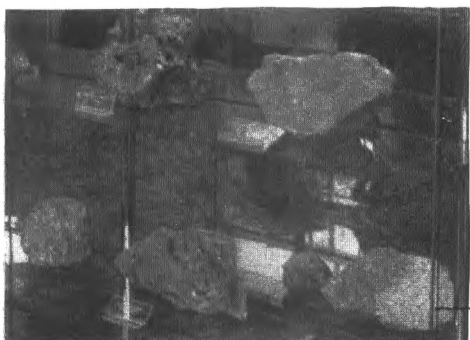
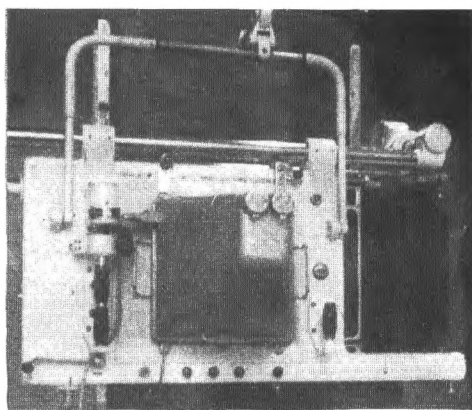
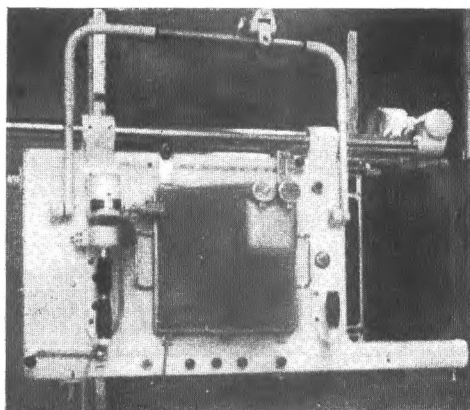
ОПЕЧАТКИ И ИСПРАВЛЕНИЯ

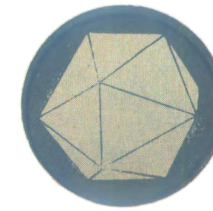
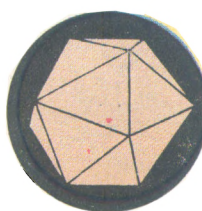
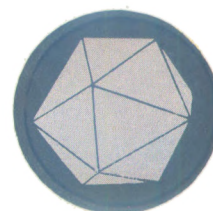
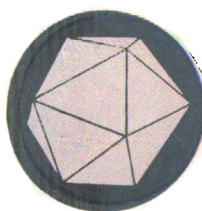
Страница	Страна	Напечатано	Должно быть
3	9 и 10 сн.	растворовых	растровых
40	8 и 17 сн.	объектами	объективами
42	2 св.	т. е.	или
65	14 сн.	ранами	экранами
72	1 сн.	фотопластографии	фотопластиграфии
86	1 св.	которого	которых
100	9 сн.	если он будет рассматривать	если рассматривать
126	7—8 сн.	то возрастают ограничения для раздельного наблюдения изображений	то для раздельного наблюде- ния изображений возрастают ограничения
145	5 сн.	краны	экраны
168	1 сн.	частота	чистота
184	26 сн.	большой	белый
192	2 св.	изображения	дисторсию
195	11 сн.	горизонтальные колебания лучей	горизонтально поляризован- ные лучи
214	23 св.	различности	различимости
289	17 св.	переносах	перекосах
295	1 сн.	снимаемого объектива	снимаемого объекта
301	19 св.	равных	ровных
330	формула (24)	π	Π
340	11 сн.	первые	передние
344	2 сн.	боковое поле	ширина поля
345	1 св.		
347	Рис. 239	M	M'
		M'	M
353	2 св.	$\frac{dx}{dx}$	$\frac{dx}{dx}$

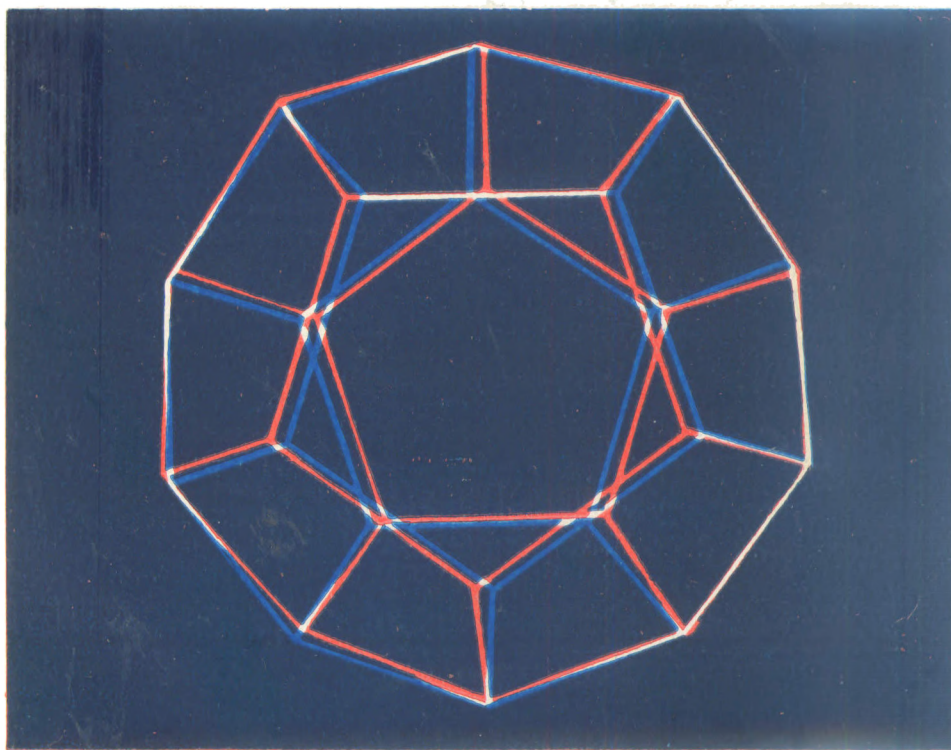
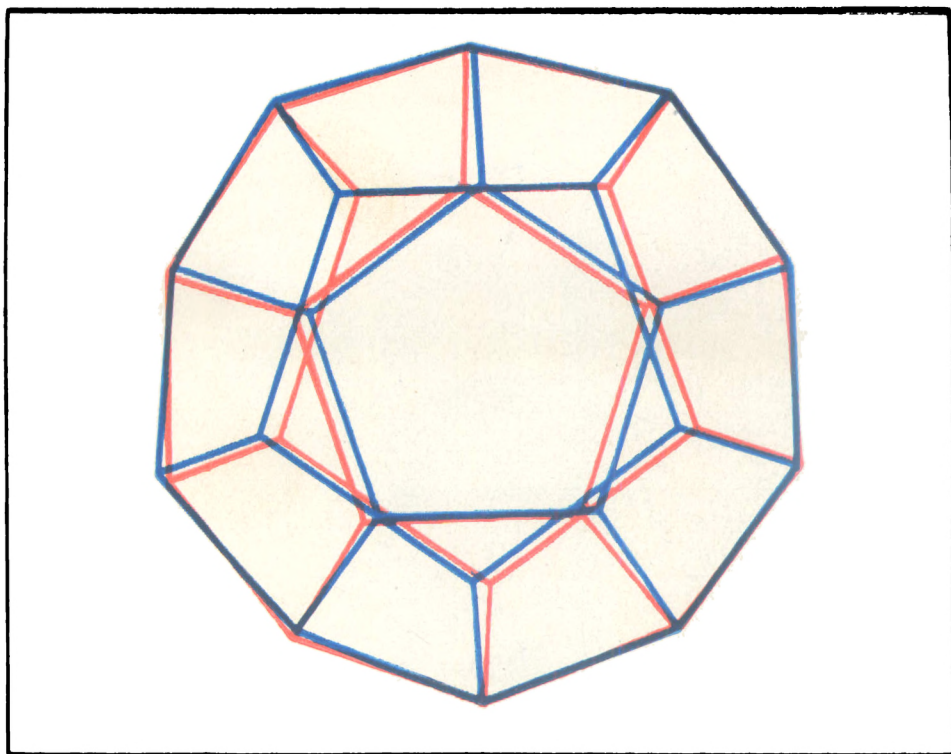








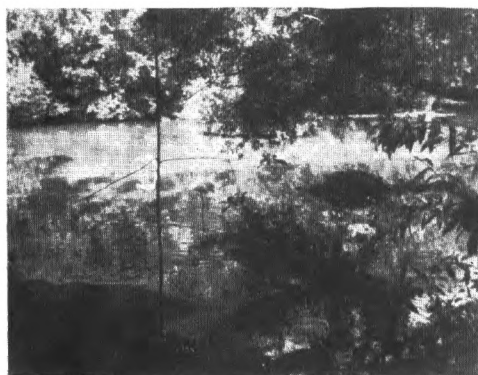




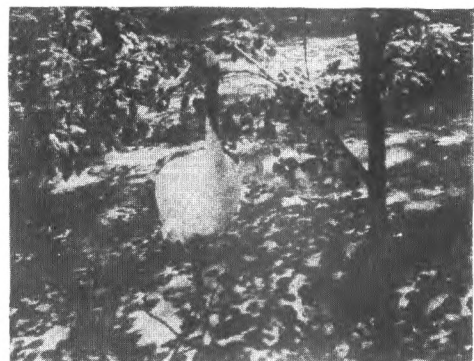
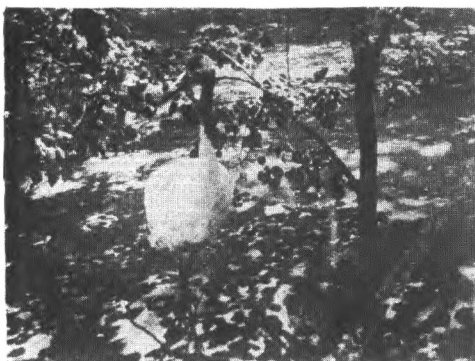
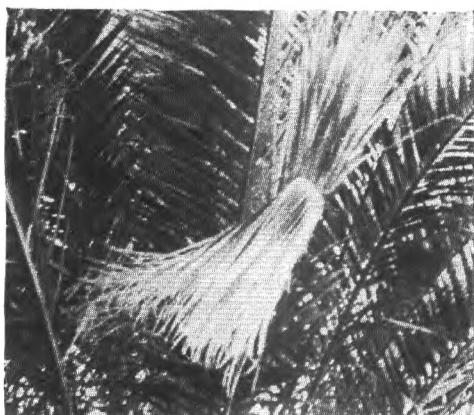




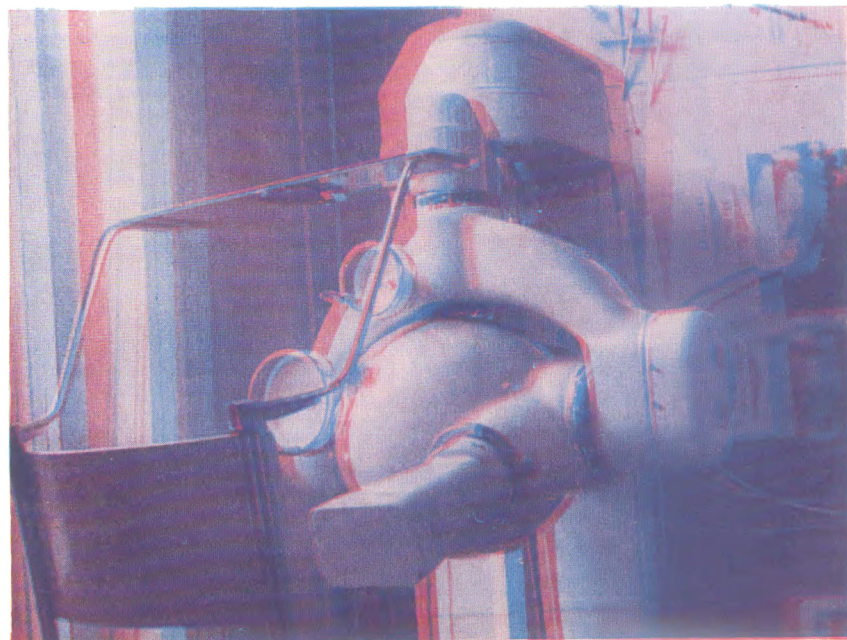
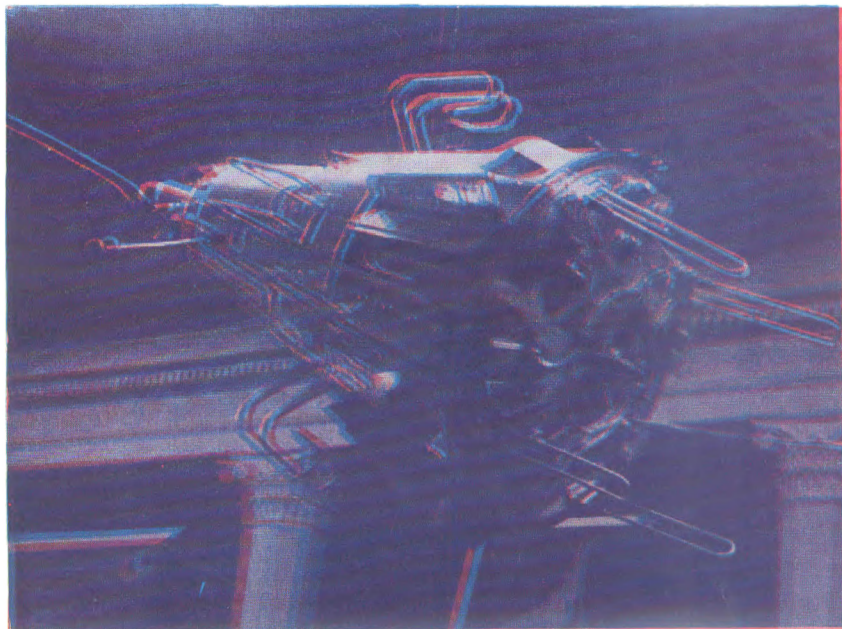


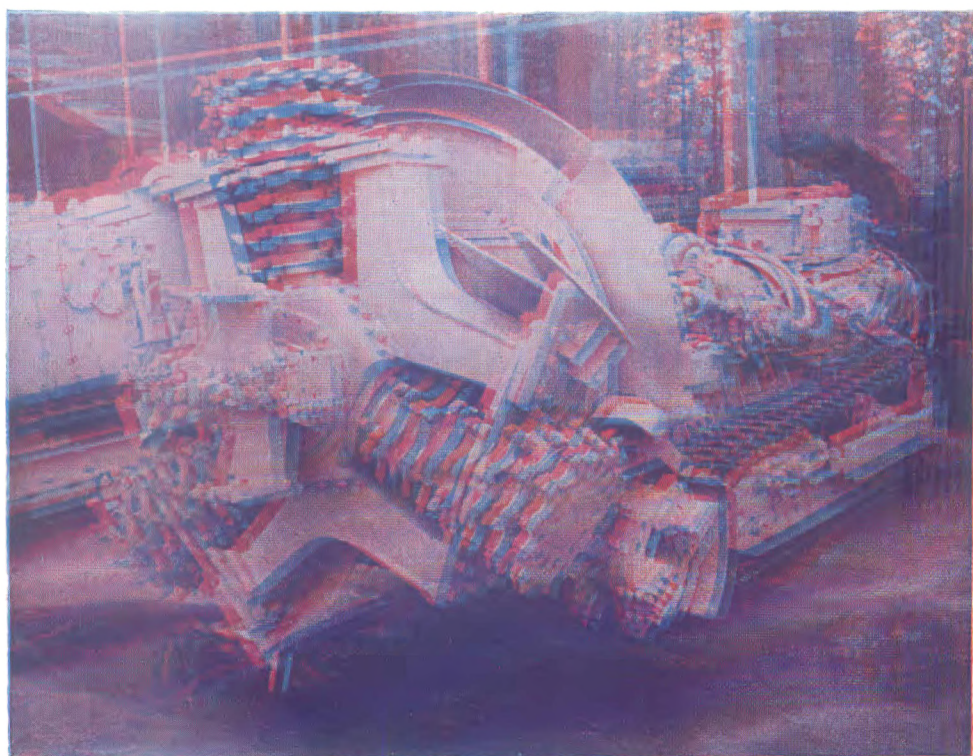
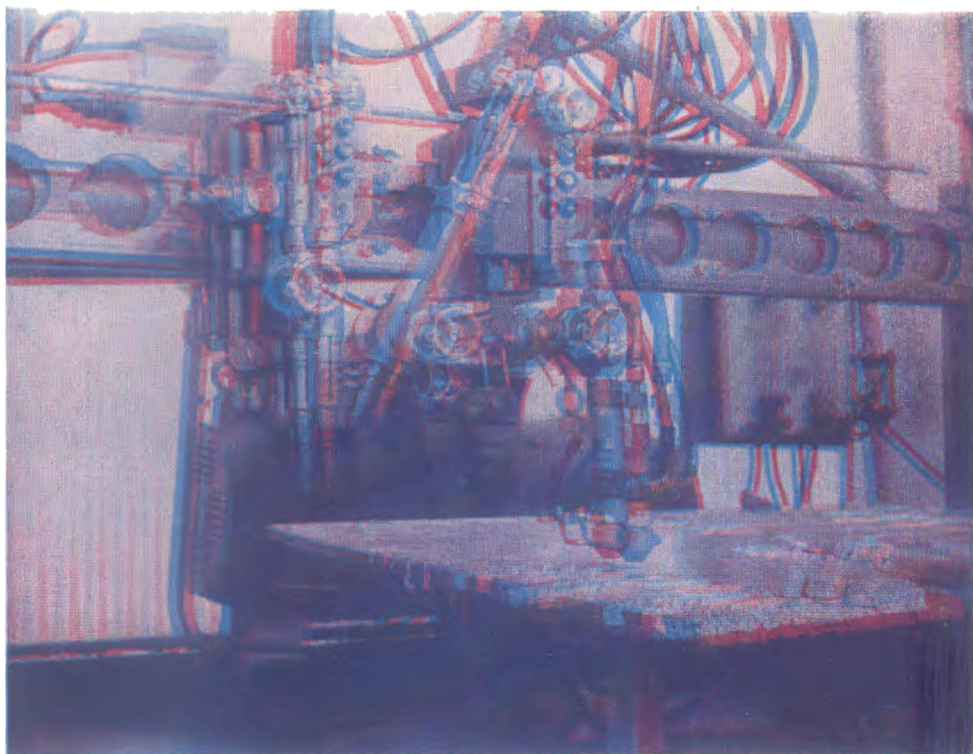


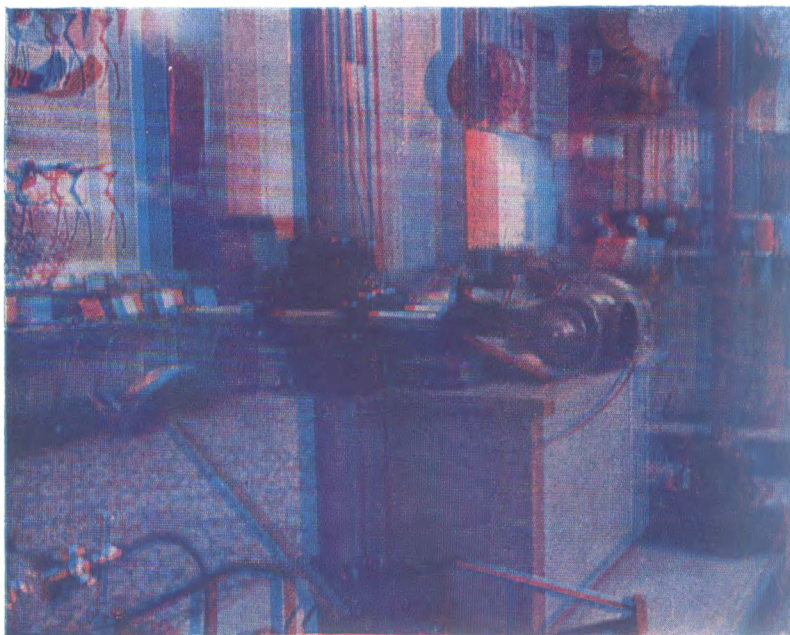


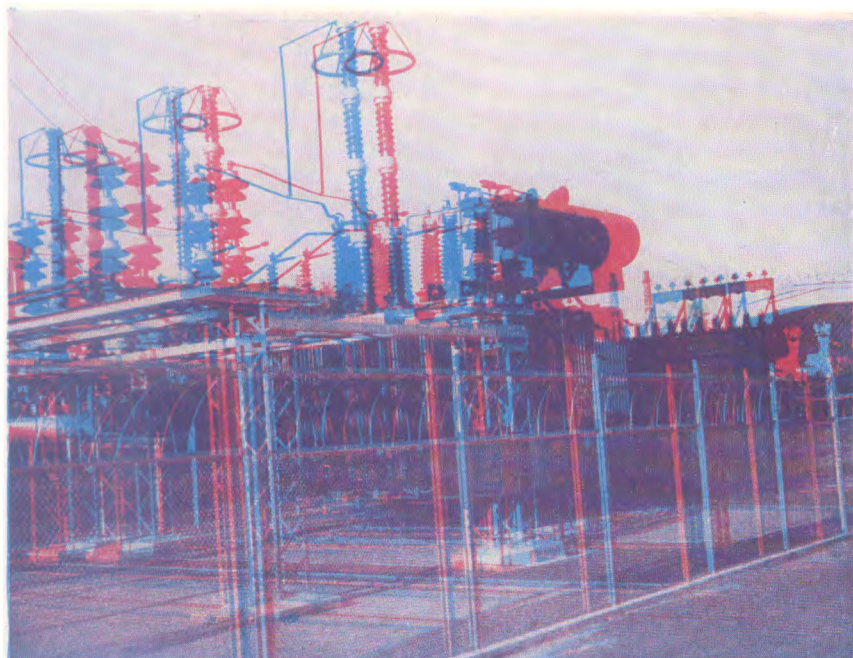


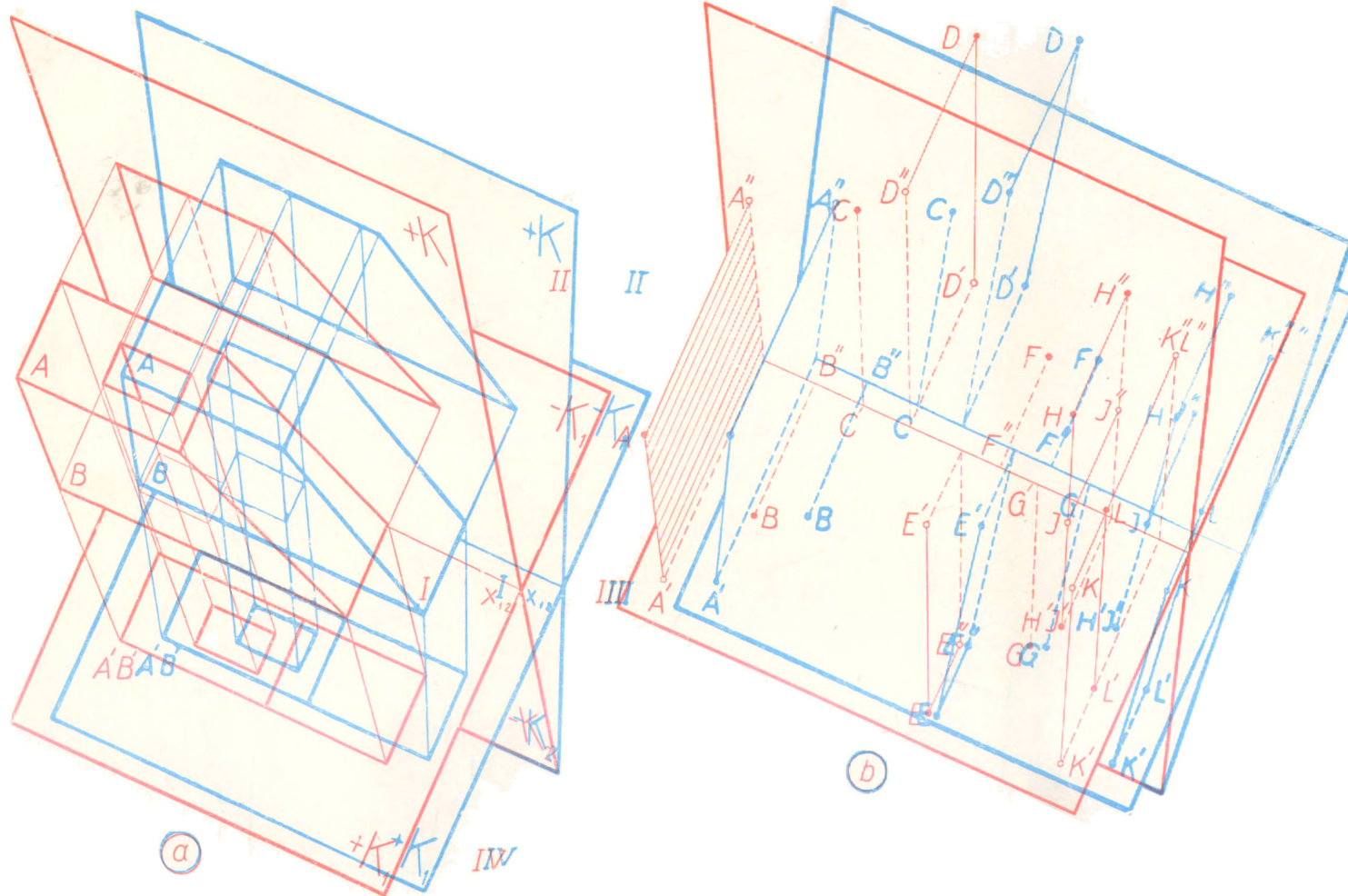


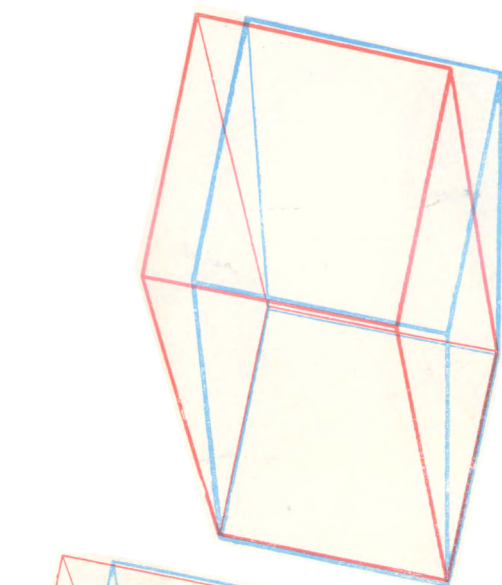




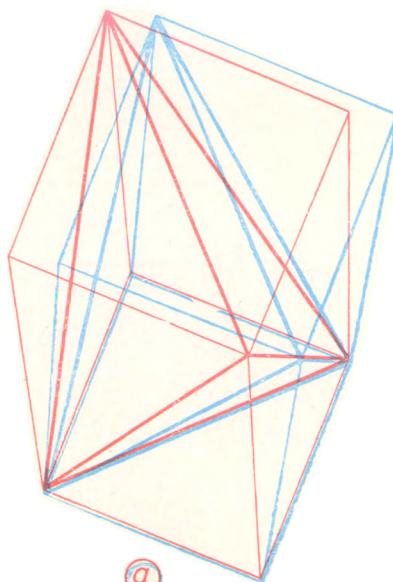




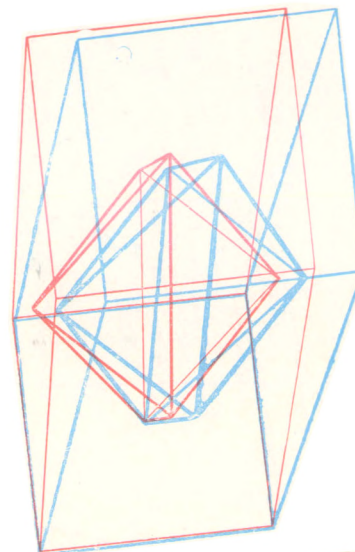




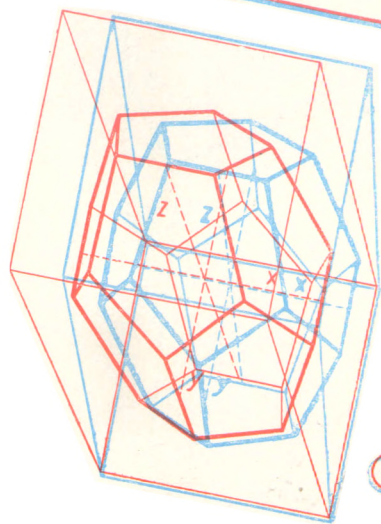
(d)



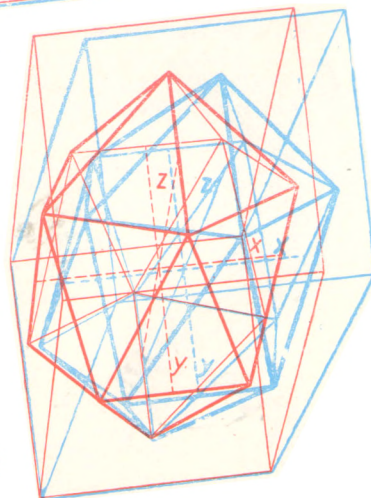
(a)



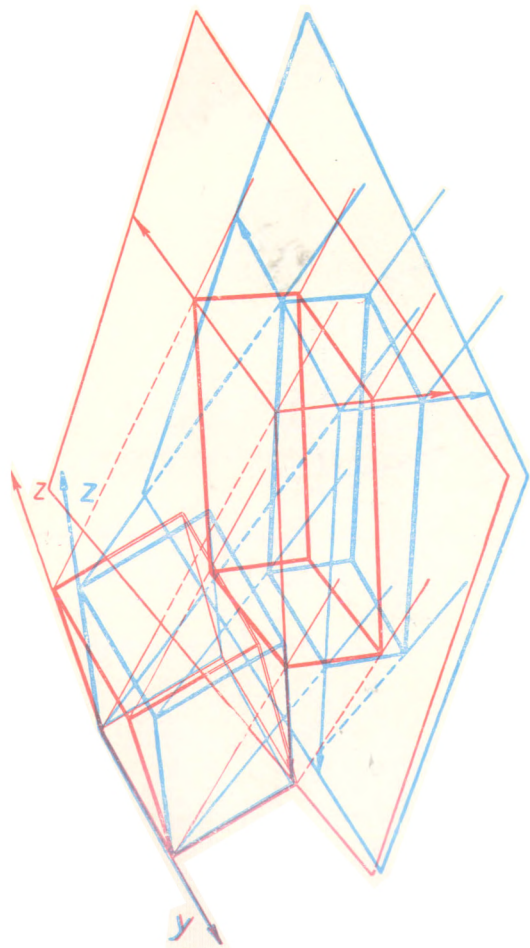
(b)



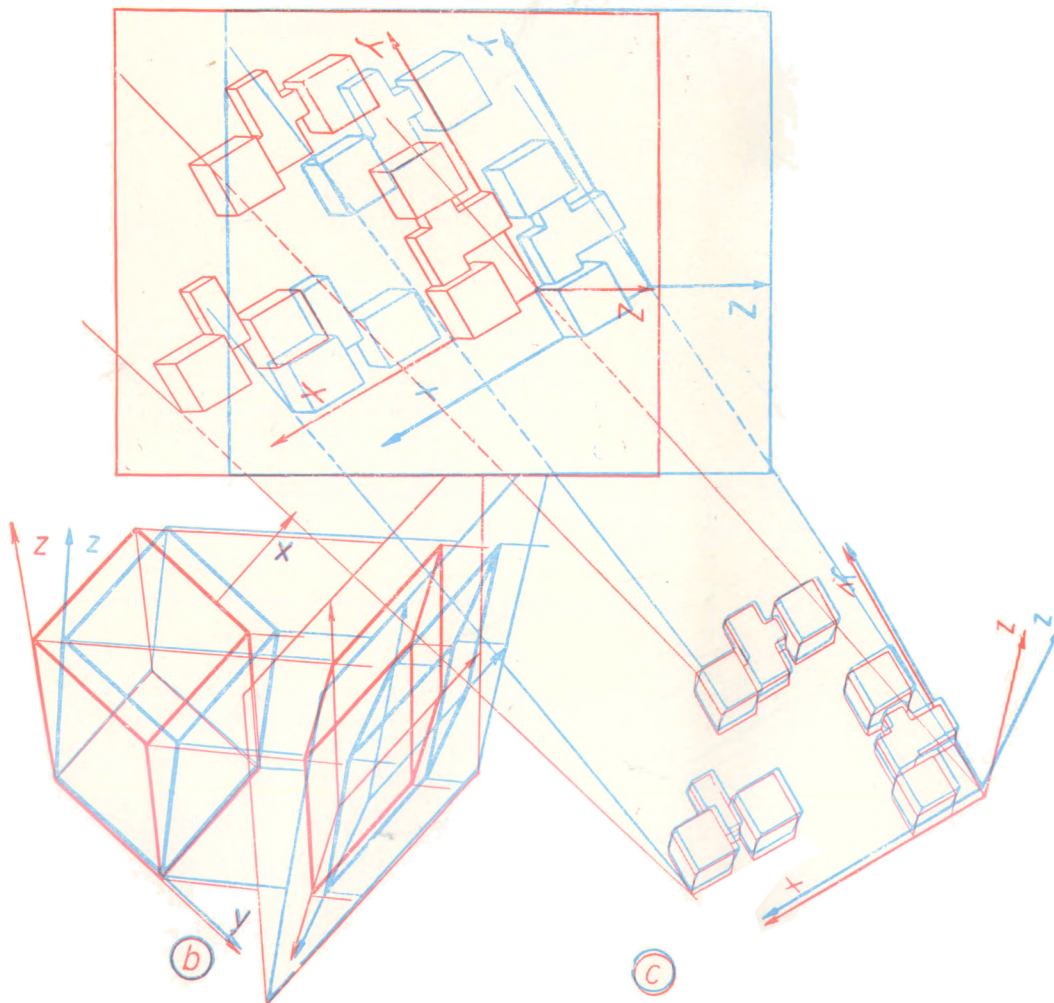
(e)



(c)



(a)



(b)

(c)

